

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

**SYSTEMATICKÝ NÁVRH PSEUDO-DIFERENČNÍCH
KMITOČTOVÝCH FILTRŮ**

SYSTEMATIC DESIGN OF PSEUDO-DIFFERENTIAL FREQUENCY FILTERS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Milota

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ondřej Sládok

BRNO 2019

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Teleinformatika**

Ústav telekomunikací

Student: Martin Milota

ID: 195391

Ročník: 3

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Systematický návrh pseudo-diferenčních kmitočtových filtrů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem bakalářské práce je systematický návrh pseudo-diferenčních kmitočtových filtrů a prostudování vlastností těchto struktur. Na základě získaných poznatků navrhnete funkční pseudo-diferenční kmitočtové filtry druhého řádu pracující v napěťovém režimu. Vhodné řešení podrobte systematickému návrhu. Nově vzniklý pseudo-diferenční kmitočtový filtr vyššího řádu podrobte experimentálnímu měření a ověřte funkčnost filtru. Výsledky porovnejte se simulacemi a teorií.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] O. Sladok, J. Koton, N. Herencsar, „Universal Pseudo-Differential Filter Using DDCC and DVCCs“. Elektronika Ir Elektrotechnika, 2017, vol. 23, no. 6, p. 46-52. ISSN: 1392-1215. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.5755/j01.eie.23.6.19694>
- [2] J. Koton, N. Herencsar, O. Sladok, J. Horng, „Pseudo-differential second order band reject filter using current conveyors“. AEU - International Journal of Electronics and Communications, vol. 70, no. 6, pp. 814-821, 2016. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.aeue.2016.03.009>

Termín zadání: 1.2.2019

Termín odevzdání: 27.5.2019

Vedoucí práce: Ing. Ondřej Sládok

Konzultant:

prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Táto bakalárska práca sa zaoberá návrhom a analýzou pseudo-diferenčných filtrov vyšších rádov. Navrhnuté filtre pracujú v napäťovom móde a jedná sa o filter dolnej priepusti druhého rádu a filter pásmovej zádrže druhého rádu. Filtre využívajú tri prúdové konvejory a štyri pasívne prvky. Dva filtre dolnej priepusti sú spolu rôznymi spôsobmi kaskádovo prepojené, čím vznikol filter dolnej priepusti štvrtého rádu. Funkčnosť všetkých filtrov je overená simuláciami a filter dolnej priepusti aj experimentálnym meraním. Pri analýze filtrov je skúmaný modul, fáza, potlačenie nežiadúcej súhlasnej zložky a správanie filtrov pri znížení optimálneho napätia. Výsledky simulácií a experimentálneho merania sú prezentované pomocou závislostí vynesných do grafov. Záverom práce je úspešné overenie funkčnosti navrhutej štruktúry a porovnanie rôznych spôsobov zapojenia filtrov do kaskády.

KĽÚČOVÉ SLOVÁ

konvejory, napäťový mód, pseudo-diferenčný filter, kmitočtový filter, druhý rád, štvrtý rád, kaskádové zapojenie, dolná priepusť, pásmová zádrž, modulová charakteristika, potlačenie nežiaducej súhlasnej zložky, potlačenie nežiaduceho napájacieho signálu

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the design and analysis of a pseudo-differential filters of higher order. This designed filters work in voltage mode and it is a second-order low-pass filter and a second-order band-stop filter. The filters use three current conveyors and four passive elements. The two lower-pass filters are cascaded together in different ways to form a fourth-order low-pass filter. The functionality of all filters is verified by simulations and low-pass filter as well as experimental measurements. Filter analysis examines the module, phase, common-mode rejection ratio, and behavior of filters while reducing optimal voltage. The results of simulations and experimental measurements are presented using the plots. The conclusion of the thesis is a successful verification functionality of the designed structure and comparison of different ways of connecting the filters to the cascade.

KEYWORDS

conveyors, voltage mode, pseudo-differential filter, frequency filter, second order, fourth order, cascade wiring, low-pass, band-stop, modular characteristic, phase characteristic, common-mode rejection ratio, power supply rejection ratio

MILOTA, Martin. *Systematický návrh pseudo-diferenčných kmitočtových filtrů*. Brno, Rok, 75 s. Bakalárska práca. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedúci práce: Ing. Ondřej Sládok

VYHLÁSENIE

Vyhlasujem, že som svoju bakalársku prácu na tému „Systematický návrh pseudo-diferenčných kmitočtových filtrů“ vypracoval samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce, využitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej bakalárskej práce ďalej vyhlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto bakalárskej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a/alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovenia § 11 a nasledujúcich autorského zákona Českej republiky č. 121/2000 Sb., o práve autorskom, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon), v znení neskorších predpisov, vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovenia časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákoníka Českej republiky č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora

POĎAKOVANIE

Rád by som poďakoval vedúcemu bakalárskej práce pánovi Ing.Ondřejovi Sládokovi za odborné vedenie, konzultácie, trpezlivosť a podnetné návrhy k práci.

Brno

.....

podpis autora

POĎAKOVANIE

Výzkum popsaný v tejto bakalárskej práci bol realizovaný v laboratóriách podporených projektom SIX; registračné číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operačný program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno

.....
podpis autora

Obsah

Úvod	13
1 Kmitočtové filtre	14
1.1 Základný prehľad jednotlivých typov filtrov	14
1.2 Všeobecná prenosová funkcia filtru 2. rádu	15
2 Nediferenčné zapojenie filtra	16
2.1 Popis nediferenčných prenosov	16
3 Diferenčné zapojenie filtra	18
3.1 Popis diferenčných prenosov	18
3.2 Potlačenie nežiadúcej súhlasnej zložky	20
3.3 Potlačenie nežiadúceho napájacieho signálu	20
4 Pseudo-diferenčné zapojenie filtra	21
4.1 Transformácia nediferenčného vstupu na diferenčný vstup v napäto- vom režime	21
4.2 Transformácia nediferenčného výstupu na diferenčný vstup v napät- ovom režime 1. spôsob	22
4.3 Transformácia nediferenčného výstupu na diferenčný vstup v napät- ovom režime 2. spôsob	23
4.4 Transformácia nediferenčného výstupu na diferenčný vstup v napät- ovom režime 3. spôsob	24
5 Aktívne prvky (Konvejory)	25
5.1 Popis použitých konvejsorov v návrhu	25
5.1.1 Prúdový konvejsor druhej generácie (CCII)	25
5.1.2 Diferenčný rozdielový prúdový konvejsor (DDCC)	26
5.1.3 Diferenčný prúdový konvejsor (DVCC)	27
5.1.4 Univerzálny prúdový konvejsor(UCC)	27
6 Systematická analýza pseudo-diferenčných kmitočtových filtrov	29
7 Vlastný návrh kmitočtových filtrov	31
7.1 Pseudo-diferenčný filter dolnej priepusti pracujúci v napäťovom režime	31
7.2 Pseudo-diferenčný filter pásmovej zádrže pracujúci v napäťovom režime	37

8 Experimentálne meranie	41
8.1 Výsledky merania a simulácií pseudo-diferenčného filtra typu dolná priepusť	42
8.1.1 Modulové charakteristiky	42
8.1.2 Fázové charakteristiky	46
8.1.3 Schopnosť potlačenia súhlasného signálu	49
8.1.4 Celkové harmonické skreslenie	51
9 Záver	54
Literatúra	56
Zoznam symbolov, veličín a skratiek	59
Zoznam príloh	60
A Zapojenie pseudo-diferenčného filtra	61
B Zapojenie prevodníku nediferenčného signálu na diferenčný	67
C Zapojenie prevodníku diferenčného signálu na nediferenčný	69
D Originálne obrázky z experimentálneho merania	71

Zoznam obrázkov

2.1	Všeobecný dvojbran s vstupnými a výstupnými veličinami	16
2.2	Ukážka prúdu I_2 tečúceho von z bloku	17
3.1	Ukážka diferenčného prúdového prenosu	18
3.2	Ukážka diferenčného napätového prenosu	19
3.3	Ukážka diferenčného prúdového prenosu s prúdovým zdrojom	20
3.4	Ukážka diferenčného napätového prenosu s napätovým zdrojom . . .	20
4.1	Nesymetrický vstup v napätovom prenose s využitím prúdového kon- veju CCII	22
4.2	Symetrický vstup v napätovom prenose s využitím diferenčného prú- dového konveju DVCC	22
4.3	Nesymetrický výstup v napätovom prenose s využitím prúdového kon- veju CCII	23
4.4	Symetrický výstup v napätovom prenose s využitím prúdového kon- veju CCII	23
4.5	Symetrický výstup v napätovom prenose s využitím diferenčného prú- dového konveju DVCC	24
4.6	Symetrický výstup v napätovom prenose s využitím výstupnej brány Z- a rezistoru R'_x	24
5.1	Schématická značka CCII	26
5.2	Schématická značka DDCC	26
5.3	Schématická značka DVCC	27
5.4	Schématická značka UCC	28
5.5	Vnútna štruktúra UCC	28
6.1	Všeobecné priame kaskádové zapojenie pseudo-diferenčného filtra . .	29
6.2	Všeobecné krížené kaskádové zapojenie pseudo-diferenčného filtra . .	29
6.3	Všeobecné priame kaskádové zapojenie pseudo-diferenčného filtra s ak- tívnym prvkom $VCVS$	30
6.4	Všeobecné krížené kaskádové zapojenie pseudo-diferenčného filtra s ak- tívnym prvkom $VCVS$	30
7.1	Navrhnutý pseudo-diferenčný filter dolnej priepusti pracujúci v napä- ťovom režime	31
7.2	Modulová charakteristika dolnej priepusti 2. rádu	34
7.3	Modulová charakteristika dolnej priepusti 4. rádu	35
7.4	Fázová charakteristika dolnej priepusti 2. rádu	36
7.5	Fázová charakteristika dolnej priepusti 4. rádu	36
7.6	Navrhnutý pseudo-diferenčný filter pásmovej zádrže pracujúci v na- pätovom režime	37

7.7	Modulová charakteristika pásmovej zádrže 2. rádu	39
7.8	Fázová charakteristika pásmovej zádrže 2. rádu	40
8.1	Bloková schéma zapojenia dosky pre experimentálne meranie	42
8.2	Obrázok zapojenia dvoch dosiek do kaskády s prevodníkmi (priame zapojenie)	42
8.3	Modulová charakteristika dolnej priepusti 2. rádu porovnanie experimentálneho priebehu so simulovaným a teoretickým priebehom	43
8.4	Modulová charakteristika dolnej priepusti 2. rádu porovnanie priebehu pri znížení napätia na $\pm 1,50\text{ V}$	44
8.5	Modulová charakteristika dolnej priepusti 4. rádu porovnanie experimentálneho priebehu so simulovaným a teoretickým priebehom	45
8.6	Modulová charakteristika dolnej priepusti 4. rádu porovnanie priebehu pri znížení napätia na $\pm 1,50\text{ V}$	45
8.7	Fázová charakteristika dolnej priepusti 2. rádu porovnanie experimentálneho priebehu so simulovaným a teoretickým priebehom	46
8.8	Fázová charakteristika dolnej priepusti 2. rádu porovnanie priebehu pri znížení napätia na $\pm 1,50\text{ V}$	47
8.9	Fázová charakteristika dolnej priepusti 4. rádu porovnanie experimentálneho priebehu so simulovaným a teoretickým priebehom	48
8.10	Fázová charakteristika dolnej priepusti 4. rádu porovnanie priebehu pri znížení napätia na $\pm 1,50\text{ V}$	49
8.11	Schopnosť potlačenia súhlasného signálu dolnej priepusti 2. rádu pri optimálnom a zníženom napätí	50
8.12	Schopnosť potlačenia súhlasného signálu dolnej priepusti 4. rádu pri optimálnom a zníženom napätí	50
8.13	Celkové harmonické skreslenie dolnej priepusti 2. rádu experimentálne meranie	51
8.14	Celkové harmonické skreslenie dolnej priepusti 4. rádu experimentálne meranie pri optimálnom napätí	52
8.15	Celkové harmonické skreslenie dolnej priepusti 4. rádu experimentálne meranie pri zníženom napätí o 9%	53
A.1	Bloková schéma dosky pre experimentálne meranie	62
A.2	Návrh dosky plošných spojov (cesty zhora)	63
A.3	Návrh dosky plošných spojov (cesty zospodu)	63
A.4	Návrh dosky plošných spojov (súčiastky)	64
A.5	Obrázok dosky pseudo-diferenčného kmitočtového filtra typu dolná priepust (pohľad zhora)	64
A.6	Obrázok dosky pseudo-diferenčného kmitočtového filtra typu dolná priepust (pohľad zospodu)	65

A.7	Obrázok celkového kaskádového zapojenia pseudo-diferenčných kmitočtových filtrov na pracovisku	65
A.8	Obrázok celkového pohľadu na pracovisko so zapojenými doskami . . .	66
B.1	Bloková schéma prevodníku nediferenčného signálu na diferenčný . . .	67
B.2	Obrázok dosky prevodníku nediferenčného signálu na diferenčný (pohľad zhora)	68
B.3	Obrázok dosky prevodníku nediferenčného signálu na diferenčný (pohľad zospodu)	68
C.1	Bloková schéma prevodníku diferenčného signálu na nediferenčný . . .	69
C.2	Obrázok dosky prevodníku diferenčného signálu na nediferenčný (pohľad zhora)	70
C.3	Obrázok dosky prevodníku diferenčného signálu na nediferenčný (pohľad zospodu)	70
D.1	Obrázok originálneho merania modulu dolnej priepusti 2. rádu pri napätí $\pm 1,65\text{ V}$	71
D.2	Obrázok originálneho merania fáze dolnej priepusti 2. rádu pri napätí $\pm 1,65\text{ V}$	72
D.3	Obrázok originálneho merania modulu dolnej priepusti 4. rádu pri napätí $\pm 1,65\text{ V}$ (priame zapojenie)	72
D.4	Obrázok originálneho merania fáze dolnej priepusti 4. rádu pri napätí $\pm 1,65\text{ V}$ (priame zapojenie)	73
D.5	Obrázok originálneho merania modulu dolnej priepusti 4. rádu pri napätí $\pm 1,65\text{ V}$ (krížené zapojenie)	73
D.6	Obrázok originálneho merania fáze dolnej priepusti 4. rádu pri napätí $\pm 1,65\text{ V}$ (krížené zapojenie)	74
D.7	Obrázok originálneho merania, spektrum signálu pre THD dolnej priepusti 4. rádu (priame zapojenie)	74
D.8	Obrázok originálneho merania, spektrum signálu pre THD dolnej priepusti 4. rádu (krížené zapojenie)	75

Zoznam tabuliek

1.1	Koeficienty pre kmitočtové filtre 2. rádu	15
7.1	Butterworthove normalizované polynómy menovateľa	32
7.2	Butterworthove polynómy vo forme koeficientov	33

Úvod

Kmitočtové filtre sú v súčasnosti neoddeliteľnou súčasťou väčšiny elektronických zariadení. Aj keď sa v dnešnej dobe vo veľkom rozvíja digitálna technika, stále musíme spracovávať analógové signály, a preto sa táto práca zaoberá navrhovaním pseudo-diferenčných kmitočtových filtrov pracujúcich v napäťovom režime. Hlavná myšlienka pseudo-diferenčných filtrov je spojenie kladných vlastností nediferenčných kmitočtových filtrov a plne diferenčných kmitočtových filtrov. V teoretickej časti sa nachádza základná definícia kmitočtových filtrov. Ďalej je vysvetlená problematika nediferenčných zapojení filtra, diferenčných zapojení filtra, potlačenie súhlasnej zložky CMRR, potlačenie nežiadúceho šumu zo zdroja napájania PSRR a definícia pseudo-diferenčných zapojení filtra. V nasledujúcej časti teoretického úvodu sú definované použité aktívne prvky v návrhu a posledná časť teórie sa venuje systematickej analýze kaskádovo prepojených filtrov 2. rádu, z ktorých týmto prepojením vzniknú filtre 4. rádu. Samotnému návrhu dvoch pseudo-diferenčných kmitočtových filtrov pracujúcich v napäťovom režime je venovaná kapitola číslo 7. Tieto filtre sú najprv teoreticky navrhnuté pomocou programu Snap, vďaka ktorému je overená matematická správnosť prenosovej funkcie. Následne sú filtre podrobené simuláciám v programe OrCAD. Navrhnuté filtre sú simulované ako filtre 2. rádu, tak aj filtre 4. rádu. Výsledky simulácií sú spracované do grafov a analyzované. Posledná kapitola číslo 8. je venovaná samotnému experimentálnemu meraniu pseudo-diferenčného kmitočtového filtra typu dolná priepusť pre 2. a 4. rád. Výsledky merania sú taktiež spracované do grafov a porovnané so simuláciami a teoretickým priebehom.

1 Kmitočtové filtre

Pod pojmom kmitočtové filtre rozumieme lineárne elektrické obvody, väčšinou dvoj-
rany, ktoré sa používajú vo veľa oblastiach elektroniky a elektrotechniky.

Základnou funkciou je niektoré kmitočty prepustiť bez útlmu, to sa volá oblasť
priepustného pásma a niektoré kmitočty zase potlačiť, čo sa nazýva nepriepustné
pásmo.

Veľmi často sa používa v rádiotechnike napríklad dolná a horná priepusť ako vý-
hybka pre rozdelenie kmitočtových pásiem a pásmová priepusť pre výber prijímaných
signálov v anténnych obvodoch. Ďalej sa vo veľkej miere používajú v elektroakustike
korekčné filtre so systémom omedzenia šumu (Dolby), horná, dolná a pásmová prie-
pusť ako výhybky k reproduktorovým sústavám. Okrem vyššie spomínaných využití
existuje mnoho ďalších, takže môžeme povedať, že sa využívajú skoro vo všetkých
oblastiach elektrotechniky a elektroniky.

Rozlišujeme filtre na aktívne a pasívne. Pasívne filtre sú tvorené len pasívnymi
súčiastkami ako sú rezistor R , kapacitor C a induktor L . Filtre aktívne sú tvorené
aktívnym prvkom, ktorý je zapojený spolu s pasívnymi prvkami – rezistor R a kapa-
citor C . Hlavnou výhodou aktívneho filtru oproti pasívnemu je ľahká preladiteľnosť,
či nastaviteľnosť.[1]

1.1 Základný prehľad jednotlivých typov filtrov

Ako bolo spomínané vyššie, filtre delíme na aktívne a pasívne, podľa použitia súčias-
tok. Tieto filtre, či už aktívne alebo pasívne, rozdeľujeme podľa toho, v akom pásme
prepúšťajú, či naopak neprepúšťajú signál. Takéto filtre nazývame selektívne filtre.
Poznáme dolnú priepusť (DP), hornú priepusť (HP), pásmovú zádrž (PZ), pásmovú
priepusť (PP) a fázovací článok (FČ) [2], [3].

1.2 Všeobecná prenosová funkcia filtru 2. rádu

Všeobecná funkcia filtru 2. rádu v tvare polynómu je [4]

$$K(p) = \frac{a_2 p^2 + a_1 p + a_0}{b_2 p^2 + b_1 p + b_0}. \quad (1.1)$$

Kde pre koeficienty b_i platí:

$$b_2 = 1, b_1 = \frac{\omega_0}{Q}, b_0 = \omega_0^2 \quad (1.2)$$

Na realizáciu kmitočtového filtru 2. rádu sú v tab. 1.1 definované koeficienty a_2, a_1, a_0

Tab. 1.1: Koeficienty pre kmitočtové filtre 2. rádu

Typ filtru	a_2	a_1	a_0
Dolná priepusť	0	0	$K_0 \omega_0^2$
Horná priepusť	K_0	0	0
Pásmová priepusť	0	$K_0 \omega_0 / Q$	0
Fázovací článok	K_0	$-K_0 \omega_0 / Q$	$K_0 \omega_0^2$
Pásmová zádrž	K_0	0	$-K_0 \omega_0^2$

2 Nediferenčné zapojenie filtra

Nediferenčné filtre majú výhodu oproti diferenčným v tom, že sú lacnejšie na výrobu, návrh je omnoho jednoduchší a majú uplatnenie, ak je vysielateľ a prijímač blízko seba. Pri dlhších vzdialenostiach tieto obvody nefungujú. Majú jeden vstup a jeden výstup, kde je vždy druhá svorka uzemnená. Nevýhodou je náchylnosť na súhlasnú zložku, ktorá vzniká na vstupe obvodu a taktiež na šum a offset [5].

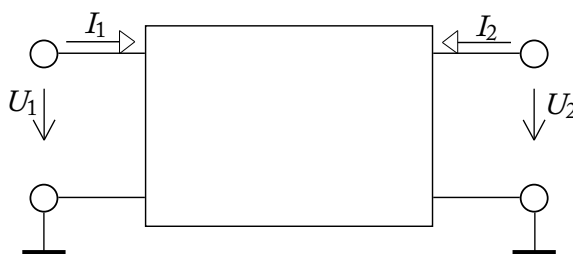
2.1 Popis nediferenčných prenosov

V tejto časti textu popisujem nediferenčné prúdové a napäťové prenosy uvedené v [6]. Nediferenčný prúdový prenos je definovaný, ako pomer výstupného prúdu k vstupnému prúdu, vynásobený hodnotou -1 , ak vychádzame z toho, že prúdy značíme smerom dovnútra, ako môžeme vidieť znázornené na obr. 2.1. Toto vyjadruje nasledujúca rovnica:

$$K_I = -\frac{I_2}{I_1} \quad (2.1)$$

Nediferenčný napäťový prenos je definovaný veľmi podobne, a to ako pomer výstupného napätia k vstupnému napätiu, čo vyjadruje následná rovnica:

$$K_U = \frac{U_2}{U_1} \quad (2.2)$$



Obr. 2.1: Všeobecný dvojbran s vstupnými a výstupnými veličinami

Prúd I_2 tečie v skutočnosti von z dvojbranu do funkčného bloku, ale podľa dohody sa tento prúd zakresľuje smerom dovnútra, a preto je v rovnici (2.1) znamienko mínus.

Niekedy sa v literatúre môžeme taktiež stretnúť pri popise prúdového prenosu s výstupným prúdom I_2 , ktorý je zakreslený smerom von zo zapojenia [7]. V tomto prípade je prenos K_I vyjadrený, ako kladný podiel výstupného prúdu a vstupnému prúdu. Takéto znázornenie rešpektuje šírenie signálu zo vstupu na výstup obvodu, napriek nedodržaniu konvencie označenia kladných prúdov dovnútra. Takýmto spôsobom pri použití tejto orientácie predchádzame situácii, kedy by sa muselo v zapojení pri výstupnom signále znázorňovať znamienko mínus alebo by musela byť

popisovaná funkcia vyjadrovaná s opačne orientovanou fázou. Situáciu demonštruje obr. 2.2 a prúdový prenos je vyjadrený rovnicou (2.3), pričom napäťový zostáva nezmenený.



Obr. 2.2: Ukážka prúdu I_2 tečúceho von z bloku

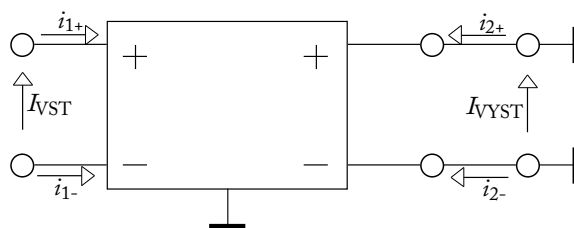
$$K_I = \frac{I_2}{I_1} \quad (2.3)$$

3 Diferenčné zapojenie filtra

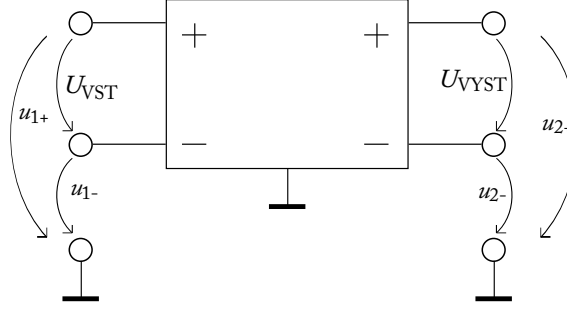
Diferenčné zapojenia sú svojou štruktúrou zložitejšie ako nediferenčné, potrebujú omnoho viac prvkov, a teda sú aj drahšie na výrobu. Oproti nediferenčným zapojeniam, majú diferenčné zapojenia dva vstupy a dva výstupy s opačnou polaritou. Dobré potláčajú súhlasnú zložku Common-mode, zvyšujú dynamický rozsah, maximálne dokážu odstrániť šum a pozitívne ovplyvňujú kvalitu signálu[8]. Diferenčné filtre vznikajú napríklad zrkadlením nediferenčného obvodu k zemi, a to buď transformáciou priečnych alebo pozdĺžnych štruktúr. Ako je uvedené v [9], transformáciu uskutočnime tak, že nediferenčný obvod zrkadlíme k zemi a zmeníme len parametre prvkov, ktoré sa nachádzajú v priečnych vetvách. Pri pozdĺžnych prvkoch sa parametre ani poloha nijako nezmenia. Hodnota rezistoru v pozdĺžnej vetve sa zníži na polovicu oproti pôvodnej hodnote a transformujú sa na dva. Hodnota kapacitoru v pozdĺžnej vetve sa zvýši na dvojnásobok oproti pôvodnej hodnote a transformuje sa na dva. Podobne aj pri pozdĺžnej transformácii, ako je uvedené v [9], transformáciu uskutočnime tak, že nediferenčný obvod zrkadlíme k zemi a zmeníme len parametre prvkov, ktoré sa nachádzajú v pozdĺžnych vetvách. Pri priečnych prvkoch sa parametre ani poloha nijako nezmení. Hodnota rezistoru v pozdĺžnej vetve sa zníži na polovicu oproti pôvodnej hodnote a transformujú sa na dva. Hodnota kapacitoru v pozdĺžnej vetve sa zvýši na dvojnásobok oproti pôvodnej hodnote a transformuje sa na dva.

3.1 Popis diferenčných prenosov

Diferenčný prúdový prenos definujeme [6] ako pomer diferenčného výstupného prúdu ku diferenčnému vstupnému prúdu, vynásobený hodnotou -1 , ak vychádzame z toho, že prúdy značíme smerom dovnútra podľa konvencie, ako môžeme vidieť znázornené na obr. 3.1. Diferenčný napäťový prenos definujeme ako výstupné diferenčné napätie ku vstupnému diferenčnému napätiu. Situáciu znázorňuje Obr. 3.2



Obr. 3.1: Ukážka diferenčného prúdového prenosu



Obr. 3.2: Ukážka diferenčného napätového prenosu

Ak uvažujeme, že pre diferenčný vstupný a výstupný prúd platia nasledujúce rovnice,

$$I_{VST} = i_{1+} - i_{1-},$$

$$I_{VYST} = i_{2+} - i_{2-}, \quad (3.1)$$

a pre diferenčné vstupné a výstupné napätie platia nasledujúce rovnice,

$$U_{VST} = u_{1+} - u_{1-},$$

$$U_{VYST} = u_{2+} - u_{2-}, \quad (3.2)$$

tak môžeme vstupný a výstupný diferenčný prúd a napätie vyjadriť nasledujúcimi rovnicami:

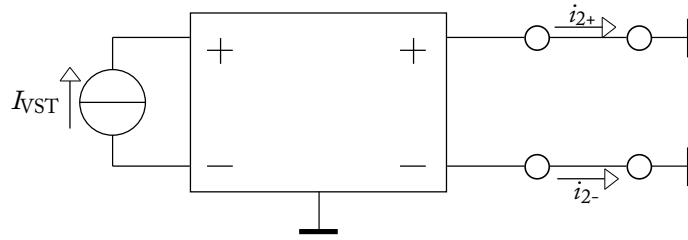
$$K_I = -\frac{I_{VYST}}{I_{VST}} = -\frac{i_{2+} - i_{2-}}{i_{1+} - i_{1-}} \quad (3.3)$$

$$K_U = \frac{U_{VYST}}{U_{VST}} = \frac{u_{2+} - u_{2-}}{u_{1+} - u_{1-}} \quad (3.4)$$

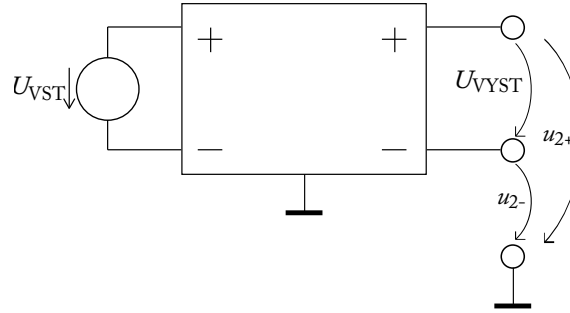
Pokiaľ aj pri diferenčných prenosoch budeme zase rešpektovať šírenie signálu vstupu na výstup obvodu, a k tomu ešte na vstup pripojíme prúdový zdroj I_1 ako môžeme vidieť na obr. 3.3, dostaneme vstupný diferenčný prúd o veľkosti $2I_{VST}$. Túto situáciu popisuje rovnica (3.5). Diferenčný napätový prenos s napätovým zdrojom môžeme vidieť na obr. 3.4 a popisuje ho rovnica (3.6)

$$K_I = \frac{i_{2+} - i_{2-}}{2I_{VST}} \quad (3.5)$$

$$K_U = \frac{u_{2+} - u_{2-}}{2U_{VST}} \quad (3.6)$$



Obr. 3.3: Ukážka diferenčného prúdového prenosu s prúdovým zdrojom



Obr. 3.4: Ukážka diferenčného napätového prenosu s napätovým zdrojom

3.2 Potlačenie nežiadúcej súhlasnej zložky

CMRR (Common-mode rejection ratio) nám udáva ako je aktívny prvok alebo diferenčné zapojenie schopné potlačiť nežiadúci súhlasný vstupný signál, ktorý je spoločný pre obidva vstupy, vzhľadom k požadovanému diferenčnému signálu. V ideálnom prípade by malo byť CMRR nekonečno, čo v praxi nie je možné. CMRR je definovaný ako pomer diferenčného zosilnenia k zosilneniu súhlasného signálu s použitím $20\log$ pravidla a merané v kladnej jednotke dB. [10] Daný vzťah pre CMRR je teda

$$\text{CMRR[dB]} = 20\log \frac{A_d}{A_{cm}}. \quad (3.7)$$

3.3 Potlačenie nežiadúceho napájacieho signálu

PSRR (Power supply rejection ratio) udáva ako je aktívny prvok alebo celé diferenčné zapojenie schopné potlačiť nežiadúci šum zo zdroja napätia. V ideálnom prípade by malo byť PSRR nekonečno, čo v praxi nie je možné. PSRR je definované ako pomer zmeny napájacieho napätia k zmene výstupného napätia s použitím $20\log$ pravidla a merané v kladnej jednotke dB. [11] Daný vzťah pre PSRR je teda

$$\text{PSSR[dB]} = 20\log \frac{\Delta V_{\text{supply}}}{\Delta V_{\text{out}}}. \quad (3.8)$$

4 Pseudo-diferenčné zapojenie filtra

Pseudo-diferenčné zapojenia sú kombináciou diferenčných a nediferenčných filtrov. Tieto zapojenia majú dva diferenčné vstupy a dva diferenčné výstupy, ale vnútorná štruktúra na rozdiel od diferenčných zapojení zostáva nediferenčná. Takéto zapojenia teda neobsahujú toľko prvkov ako diferenčné a sú menej zložité ako diferenčné zapojenia, no stále účinne potlačujú CMRR zložky. V praxi sa preto často používajú v kombinácii s úplne diferenčnými filtermi. Návrhom týchto filtrov sa teda snažím o zlúčenie kladných vlastností, ktoré ponúkajú diferenčné a nediferenčné zapojenia.

Pri práci s diferenčnými filtermi pracujúcimi v napäťovom režime platia nasledujúce vzťahy[6],[12]:

$$U_{1d} = u_{1+} - u_{1-}, U_{2d} = u_{2+} - u_{2-}, K_U = \frac{U_{1d}}{U_{2d}} = \frac{u_{2+} - u_{2-}}{u_{1+} - u_{1-}} \quad (4.1)$$

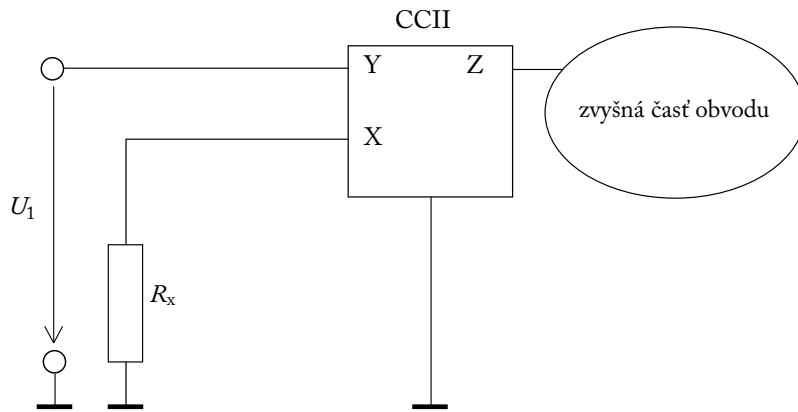
U_{1d} označuje diferenčné vstupné napätie a u_{1+}, u_{1-} sú vstupné svorky. U_{2d} označuje diferenčné výstupné napätie a u_{2+}, u_{2-} sú výstupné svorky.

Z tohto matematického popisu vyplýva, že k analýze takýchto štruktúr nám stačia len vstupné a výstupné signály a obvod medzi tým nemusíme vôbec brať do úvahy. Tým pádom môže byť na vstupe a na výstupe diferenčné napätie, teda dve rozdielové svorky na vstupe aj na výstupe. Zvyšok obvodu môže byť nediferenčný, čo je definícia práve pseudo-diferenčného filtra.

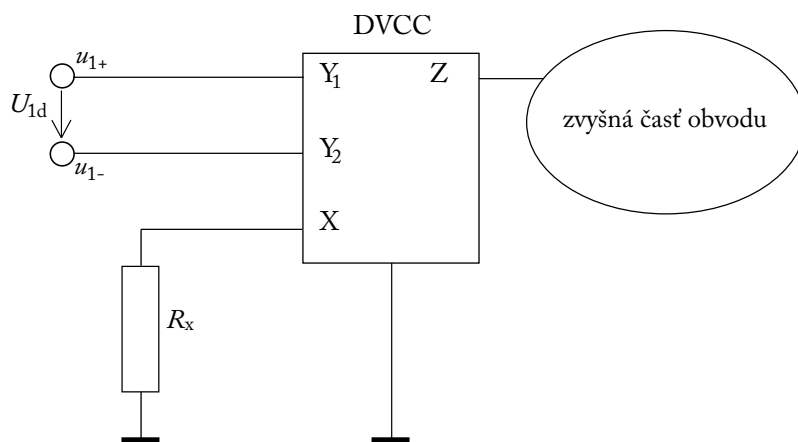
4.1 Transformácia nediferenčného vstupu na diferenčný vstup v napäťovom režime

Táto kapitola vychádza z literatúry [12], [13] a [18]. Vhodné nesymetrické štruktúry sú také, ktoré majú privedení vstupný signál priamo na napäťový vstup Y aktívneho prvku ako môžeme napríklad vidieť na obr. 4.1. Na tomto obrázku máme pre ukážku prúdový konvektor druhej generácie CCII. V tomto prípade nás nezaujíma zvyšná časť obvodu, ale sústredíme sa len na vyčlenený aktívny prvok. Aby bolo možné docieľiť symetrický vstup potrebujeme, aby boli vstupné svorky aktívneho prvku rozdielové. V našom príklade je to aktívny prvok DVCC (Differential Voltage Current Conveyor), ako môžeme vidieť na obr. 4.2.

Na rozdielové napäťové brány Y_1 a Y_2 aktívneho prvku je potom privedený vstupný diferenčný signál a jeho chovaním dochádza k odstráneniu nežiadúceho súhlasného signálu. Tým pádom je obvodom spracovaný len rozdiel užitočného signálu. Pri takejto transformácii nesymetrického vstupu na vstup symetrický je nahradený len jeden aktívny prvok a zvyšná časť obvodu zostáva bez zmeny.



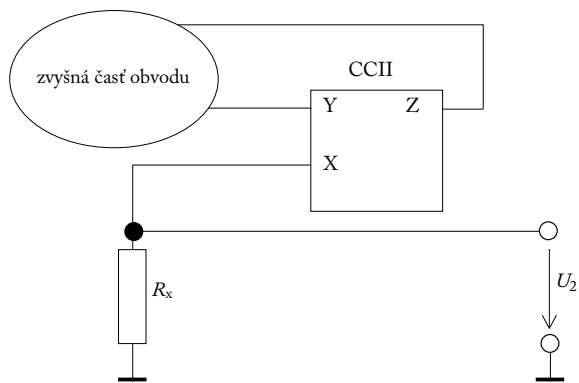
Obr. 4.1: Nesymetrický vstup v napäťovom prenose s využitím prúdového konveju CCII



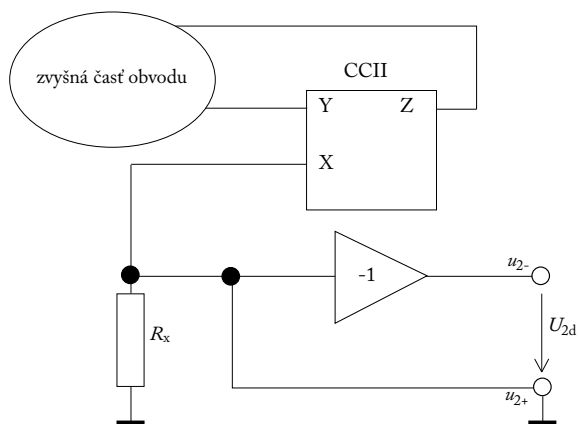
Obr. 4.2: Symetrický vstup v napäťovom prenose s využitím diferenčného prúdového konveju DVCC

4.2 Transformácia nediferenčného výstupu na diferenčný vstup v napäťovom režime 1. spôsob

Pri takejto transformácii je nutné vytvoriť rozdiel odpovedajúcich si napätí, kde je jedno fázovo posunuté o 180° voči druhému. Najjednoduchším spôsobom realizácie symetrického výstupu je doplnenie zapojenia o napäťový inventar, ako je uvedené na obr. 4.4. Pôvodné zapojenie môžeme vidieť na obr. 4.3, na ktorom je aktívny prvok vyčlenený od zvyšku obvodu a je uvedené nesymetrické napätie U_2 [12].



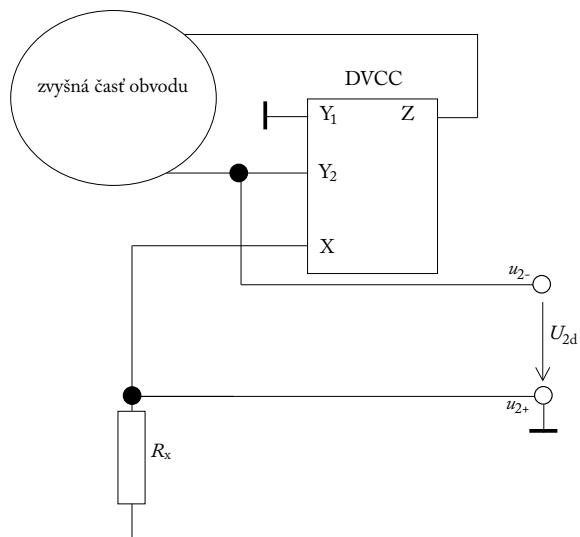
Obr. 4.3: Nesymetrický výstup v napäťovom prenose s využitím prúdového konveju CCII



Obr. 4.4: Symetrický výstup v napäťovom prenose s využitím prúdového konveju CCII

4.3 Transformácia nediferenčného výstupu na diferenčný vstup v napäťovom režime 2. spôsob

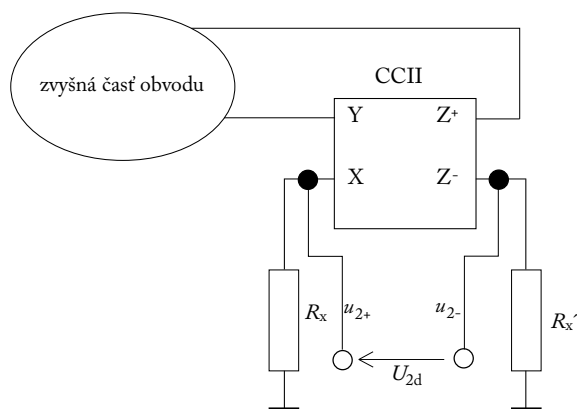
Ak je napäťová odozva snímaná na uzle, kde je pripojená brána X, ako znázorňuje obr. 4.3, môžeme použiť lepšie riešenie z pohľadu efektivity a to nahradenie pôvodného aktívneho prvku CCII za aktívny prvok DVCC ako vidíme na obr. 4.5. V tomto prípade je využitý napäťový inventar, ktorý je súčasťou tohto aktívneho prvku, a tak v porovnaní s obr. 4.4 celý výsledok zjednodušuje. [13], [18].



Obr. 4.5: Symetrický výstup v napäťovom prenose s využitím diferenčného prúdového konvejoru DVCC

4.4 Transformácia nediferenčného výstupu na diferenčný vstup v napäťovom režime 3. spôsob

Ak je zasa napäťová odozva snímaná na uzle, kde je pripojená brána X a do nej je zapojený rezistor R_x , tak v tomto prípade môžeme využiť záporný výstup Z- aktívneho prvku a do tohto výstupu je zapojený rovnaký rezistor R'_x . Týmto spôsobom dostaneme na diferenčnom výstupnom napätí U_{2d} dvojnásobný signál. [13], [18] Toto zapojenie vidíme na obr. 4.6



Obr. 4.6: Symetrický výstup v napäťovom prenose s využitím výstupnej brány Z- a rezistoru R'_x

5 Aktívne prvky (Konvejory)

Prúdový konvektor CC (current conveyor) a napäťový konvektor VC (voltage conveyor) je moderný aktívny prvok. Uskutočňuje jednotkový prenos napätia alebo prúdu s kladnou alebo zápornou polaritou, medzi osobitými bránami. Pracuje buď v zmiešanom, prúdovom alebo napäťovom režime. Prúdový konvektor je trojpólový aktívny prvok, ktorý pracuje v zmiešanom móde a prenáša prúd medzi dvomi svorkami (X a Y), kde Y má veľkú impedanciu a X má malú impedanciu. Má lepšie vlastnosti v potlačovaní nežiadúcej súhlasnej zložky (CMRR) a taktiež zabezpečuje vyšší napäťový zisk na väčšiu šírku pásma ako operačný zosilňovač. Prvá verzia prúdového konvejora bola predstavená v roku 1968 [14] a prvé praktické implementácie boli realizované bipolárnou technológiou. Od tohto času prešli konvejory vývojom a zmenami vo vnútornej štruktúre. Vznikli tri generácie prúdových konvektorov a ich rôzne modifikácie s rôznym počtom vstupov, výstupov a ich orientáciou. Žiadny z týchto typov konvektorov sa nepresadil na úkor ostatných a ani sa nezačal hromadne vyrábať, a niektoré sú len súčasťou väčších stavebných blokov. Prúdový konvektor CCI (Current Conveyor I – first-generation), prúdový konvektor CCII (Current Conveyor II – second-generation) [15] a prúdový konvektor CCIII (Current Conveyor III – third-generation) [16]. V zásade, delenie konvektorov podľa generácií nie je úplne najlepšie, pretože ďalšie generácie nepriniesli žiadne veľké vylepšenia a napríklad rozdiel medzi konvektorom prvej generácie a konvektorom tretej generácie je len v opačnej orientácii prúdu I_y [17].

5.1 Popis použitých konvektorov v návrhu

5.1.1 Prúdový konvektor druhej generácie (CCII)

Prúdový konvektor druhej generácie (CCII), ktorého schématická značka je na obr. 5.1 môžeme popísať nasledujúcimi rovnicami:

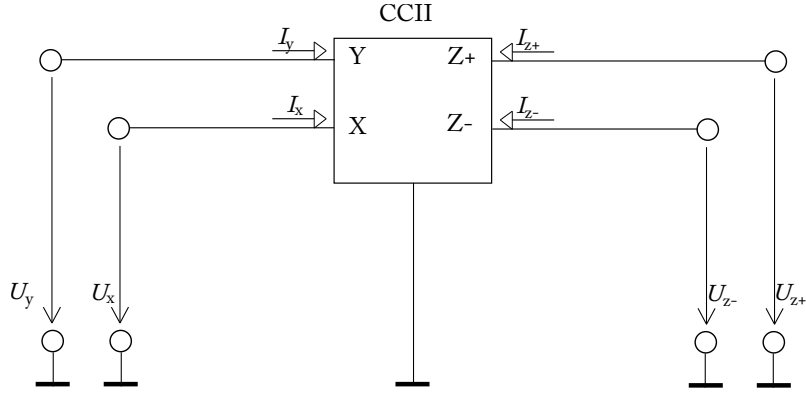
$$U_x = U_y,$$

$$I_y = 0,$$

$$I_{z+} = I_x,$$

$$I_{z-} = -I_x. \quad (5.1)$$

Jedná sa o konvektor so štyrmi bránami, z čoho jeden je vysoko impedačný napäťový vstup Y, jeden nízko impedačný prúdový vstup X a dva vysoko impedačné prúdové výstupy Z+ a Z–[15].



Obr. 5.1: Schématická značka CCII

5.1.2 Diferenčný rozdielový prúdový konvektor (DDCC)

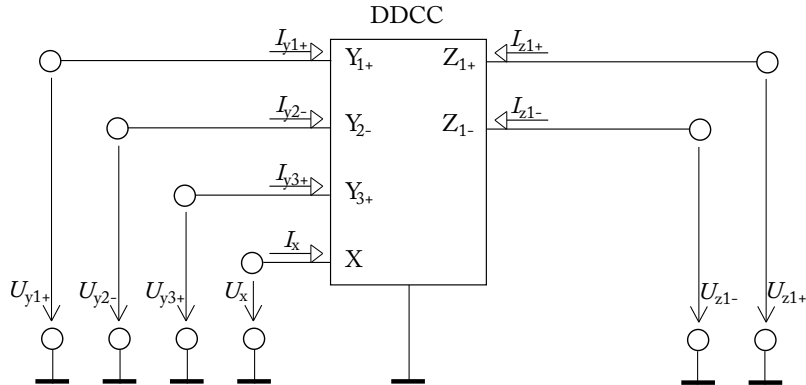
Diferenčný rozdielový prúdový konvektor (DDCC), ktorého schématická značka je na obr. 5.2 môžeme popísať nasledujúcimi rovnicami:

$$U_x = U_{y1+} - U_{y2-} + U_{y3+},$$

$$I_{y1+} = I_{y2-} = I_{y3+} = 0,$$

$$I_{z1+} = I_x,$$

$$I_{z1-} = -I_x. \quad (5.2)$$



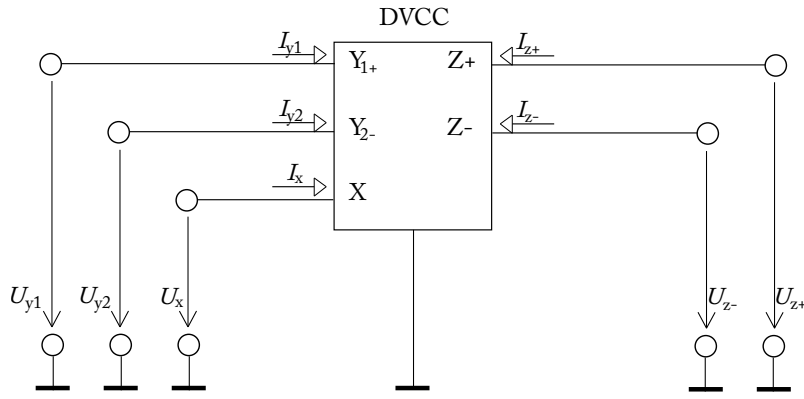
Obr. 5.2: Schématická značka DDCC

Jedná sa o konvektor s šiestimi bránami, z čoho tri sú vysoko impedačné napäťové vstupy Y_{1+} , Y_{2-} a Y_{3+} , jeden nízko impedačný prúdový vstup X a dva vysoko impedačné prúdové výstupy Z_{1+} a Z_{1-} [18].

5.1.3 Diferenčný prúdový konvektor (DVCC)

Diferenčný prúdový konvektor (DVCC), ktorého schématická značka je na obr. 5.3 môžeme popísať nasledujúcimi rovnicami:

$$\begin{aligned} U_x &= U_{y1} - U_{y2}, \\ I_{y1} &= I_{y2} = 0, \\ I_{z+} &= I_x, \\ I_{z-} &= -I_x. \end{aligned} \quad (5.3)$$



Obr. 5.3: Schématická značka DVCC

Jedná sa o konvektor s piatimi bránami, z čoho dve sú vysoko impedačné napäťové vstupy Y_1 a Y_2 , jeden nízko impedačný prúdový vstup X a dva vysoko impedačné prúdové výstupy Z_+ a Z_- [18].

5.1.4 Univerzálny prúdový konvektor (UCC)

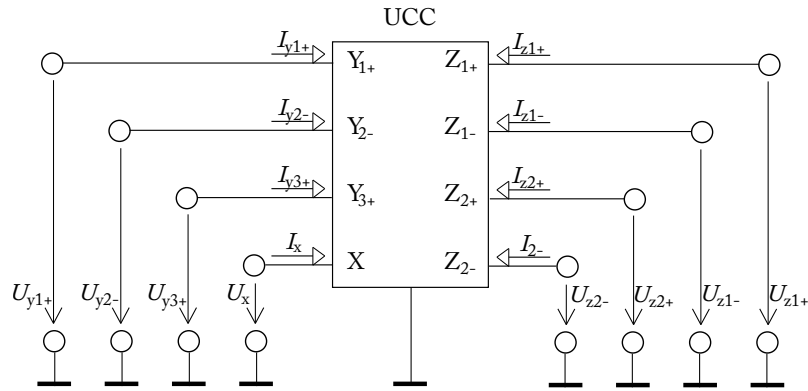
Univerzálny prúdový konvektor, ktorý vznikol na VUT fakulte elektrotechniky a komunikačných technológií v Brne je osembran [19]. Pre simulácie kmitočtových filtrov bol použitý prúdový konvektor UCC-N1B [20], ktorým boli realizované aktívne prvky CCII, DDCC a má tri vysokoimpedančné napäťové vstupy (Y_1 , Y_2 a Y_3), z čoho dva sú rozdielové (Y_1 a Y_2) a dva sú súčtové (Y_1 , Y_3). Ďalej obsahuje jeden nízkoimpedančný vstup X a štyri prúdové výstupy (Z_1 , Z_2 , Z_1 , Z_2), pričom výstupy Z_1 , Z_2 sú inverzné k výstupom Z_1 , Z_2 . Jeho chovanie môžeme popísať nasledujúcimi rovnicami:

$$\begin{aligned} U_x &= U_{y1+} - U_{y2-} + U_{y3+}, \\ I_{y1+} &= I_{y2-} = I_{y3+} = 0, \end{aligned}$$

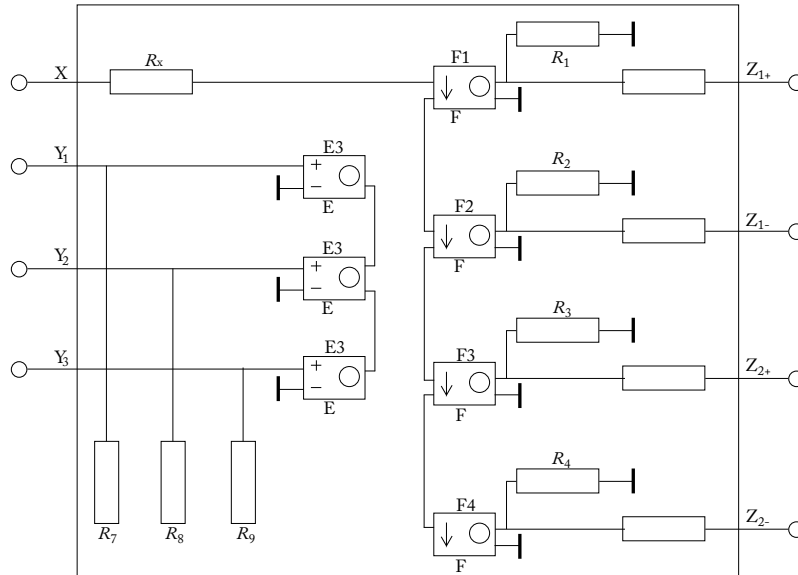
$$I_{z1+} = I_x,$$

$$I_{z1-} = -I_x. \quad (5.4)$$

Hlavnou výhodou UCC voči ostatným konvektorom je jeho univerzálnosť a praktickosť. Pomocou UCC môžeme realizovať zatiaľ všetky existujúce typy prúdových konvektorov. Stačí správne prepojiť jednotlivé svorky. Schématickú značku môžeme vidieť na obr. 5.4. Jeho vnútornú štruktúru môžeme vidieť na obr. 5.5



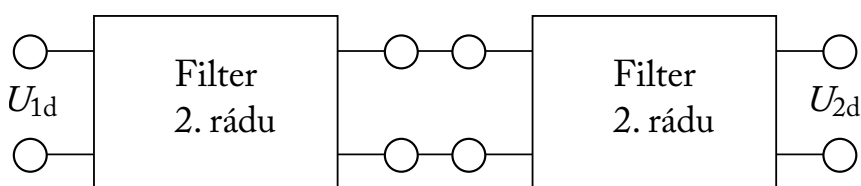
Obr. 5.4: Schématická značka UCC



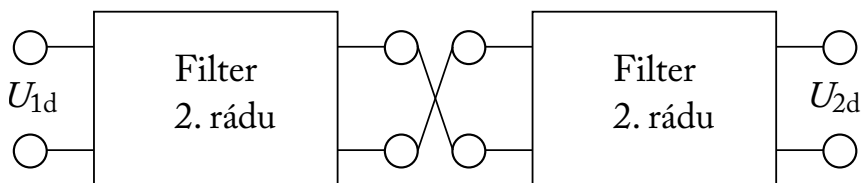
Obr. 5.5: Vnútna štruktúra UCC

6 Systematická analýza pseudo-diferenčných kmitočtových filtrov

Všetky navrhnuté pseudo-diferenčné filtre pracujúce v napäťovom režime boli podrobne analyzované. Analýza sa sústredila na vysokú vstupnú impedanciu a nulovú výstupnú impedanciu kmitočtových filtrov. Ako je uvedené v literatúre [21] jednotlivé filtre boli kaskádovo zapojené a všeobecné typy zapojenia vidíme na obr. 6.1 až obr. 6.4. Takýmto prepojením dvoch kmitočtových filtrov druhého rádu vždy dostaneme kmitočtové filtre štvrtého rádu. Na obr. 6.1 a obr. 6.2 môžeme vidieť kaskádové zapojenie dvoch kmitočtových filtrov druhého rádu, bez použitia stabilizačného prvku na zlepšenie vlastností chovania prenosovej funkcie.

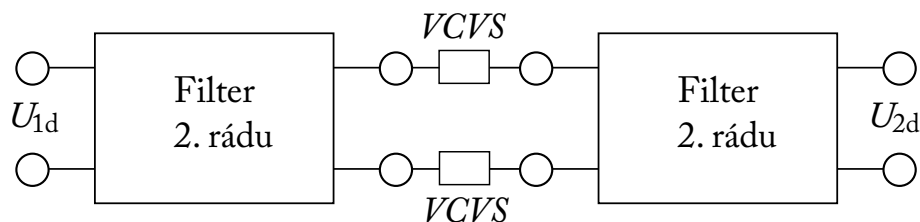


Obr. 6.1: Všeobecné priame kaskádové zapojenie pseudo-diferenčného filtra

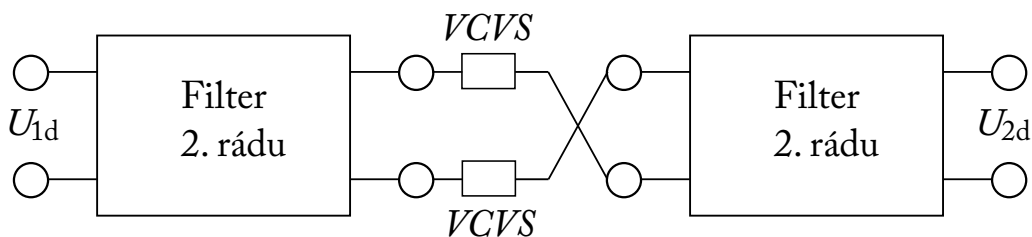


Obr. 6.2: Všeobecné krížené kaskádové zapojenie pseudo-diferenčného filtra

Na obr. 6.3 a obr. 6.4 môžeme vidieť kaskádové zapojenie dvoch kmitočtových filtrov už s použitím aktívneho prvku *VCVS* (Voltage controlled voltage source) na zlepšenie vlastností chovania prenosovej funkcie. Takýmto kaskádovým zapojením môžeme doceliť ešte vyššie rády filtru ako 6. rád, keď zapojíme kaskádovo 3 filtre za sebou, 8. rád zapojením 4 filtrov za sebou atď. Pri takomto zapojení sú na výpočet prenosovej funkcie vyššieho rádu použité Butterworthove koeficienty, ktoré sa nachádzajú v tab. 7.1 a tab. 7.2



Obr. 6.3: Všeobecné priame kaskádové zapojenie pseudo-diferenčného filtra s aktívnym prvkom *VCVS*



Obr. 6.4: Všeobecné krížené kaskádové zapojenie pseudo-diferenčného filtra s aktívnym prvkom *VCVS*

Ako príklad môžeme uviesť filter typu dolnej priepusti, ktorého všeobecná prenosová funkcia je:

$$U_{DPd} = \frac{1}{b_2 p^2 + b_1 p + b_0} \quad (6.1)$$

Následne túto prenosovú funkciu násobíme ako je uvedené v nasledujúcej rovnici:

$$U_{DPd} = \frac{1}{b_2 p^2 + b_1 p + b_0} \cdot \frac{1}{b_2 p^2 + b_1 p + b_0} \quad (6.2)$$

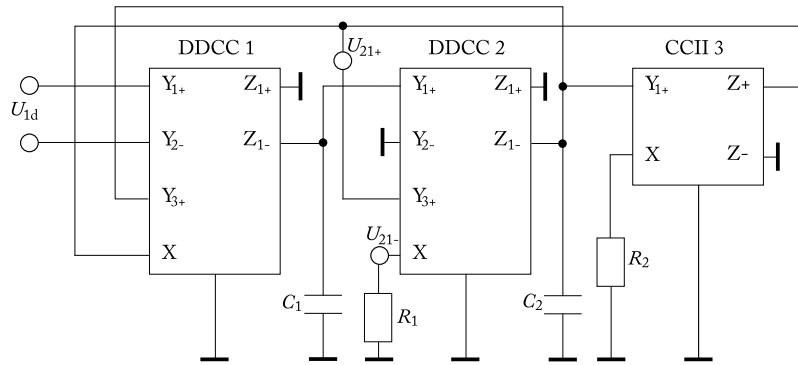
Týmto násobením sme dostali prenosovú funkciu 4. rádu a ako bolo spomínané už vyššie, tak takýmto spôsobom môžeme dosiahnuť ďalšie vyššie rády filtrov, tým, že ich budeme násobiť.

7 Vlastný návrh kmitočtových filtrov

Navrhnuté filtre boli zapojené do vyššie spomínaných typov kaskádového zapojenia filtrov a prešli simulačnou analýzou.

7.1 Pseudo-diferenčný filter dolnej priepusti pracujúci v napäťovom režime

Návrh pseudo-diferenčného filtra v napäťovom režime sa nachádza na obr. 7.1. V tomto zapojení sú využité dva diferenčne rozdielové prúdové konvejory DDCC a jeden prúdový konvektor druhej generácie CCII, kde je k DDCC 1 privedené vstupné napätie. Okrem toho štruktúra obsahuje ešte štyri pasívne prvky, a to konkrétne dva rezistory R_1, R_2 a dva kapacitory C_1, C_2 . Na rozdiel od nediferenčných filtrov potláča zložku súhlasného signálu.



Obr. 7.1: Navrhnutý pseudo-diferenčný filter dolnej priepusti pracujúci v napäťovom režime

Ak zohľadníme ideálne vlastnosti aktívnych prvkov, potom pre filtračné funkcie druhého rádu dolnej priepusti bude diferenčné výstupné napätie dané nasledujúcou rovnicou:

$$U_{21d} = \frac{1}{p^2(C_1 C_2 R_2 R_1) + p(C_1 R_2) + 1} \quad (7.1)$$

Pre druhý rád platí:

Činiteľ akosti Q a uhlový charakteristický kmitočet ω_0 môžeme vyjadriť pomocou vzťahov

$$Q = \sqrt{\frac{C_2 R_1}{C_1 R_2}}, \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{C_1 C_2 R_2 R_1}}. \quad (7.2)$$

Pre počítačovú simuláciu v programe OrCAD bol zvolený hraničný kmitočet $f_0 = 50 \text{ kHz}$, činiteľ akosti $Q = 0,707$ (Butterworthová aproximácia) a hodnoty kondenzátorov boli zvolené $C_1 = C_2 = 1 \text{ nF}$. Rezistory boli dopočítané ako $R_1 = 2250 \Omega$, $R_2 = 4502 \Omega$.

Pre štvrtý rád platí:

Na výpočet hodnôt parametrov boli použité Butterworthove koeficienty podľa literatúry [4], ktoré sa nachádzajú v tab. 7.1 a tab. 7.2.

Tab. 7.1: Butterworthove normalizované polynómy menovateľa

n (rád)	
1	$(1 + s)$
2	$(1 + 1,414s + s^2)$
3	$(1 + s)(1 + s + s^2)$
4	$(1 + 0,765s + s^2)(1 + 1,848s + s^2)$
5	$(1 + s)(1 + 0,618s + s^2)(1 + 1,618s + s^2)$
6	$(1 + 0,518s + s^2)(1 + 1,414s + s^2)(1 + 1,932s + s^2)$
7	$(1 + s)(1 + 0,445s + s^2)(1 + 1,247s + s^2)(1 + 1,802s + s^2)$
8	$(1 + 0,390s + s^2)(1 + 1,111s + s^2)(1 + 1,663s + s^2)(1 + 1,962s + s^2)$
9	$(1 + s)(1 + 0,347s + s^2)(1 + s + s^2)(1 + 1,532s + s^2)(1 + 1,879s + s^2)$
10	$(1 + 0,313s + s^2)(1 + 0,908s + s^2)(1 + 1,414s + s^2)(1 + 1,782s + s^2)(1 + 1,975s + s^2)$

Tab. 7.2: Butterworthove polynómy vo forme koeficientov

a ₀	a ₁	a ₂	a ₃	a ₄	a ₅	a ₆	a ₇	a ₈	a ₉
1									
1	1,414								
1	2,000	2,000							
1	2,613	3,414	2,613						
1	3,236	5,236	5,236	3,236					
1	3,864	7,464	9,142	7,464	3,864				
1	4,494	10,098	14,592	14,592	10,098	4,494			
1	5,126	13,137	21,846	25,688	21,846	13,137	5,126		
1	5,759	16,582	31,163	41,986	41,986	31,163	16,582	5,759	
1	6,392	20,432	42,802	74,233	74,233	64,882	42,802	20,432	6,392

Po kaskádovom zapojení filtru v programe Snap sme dostali nasledujúcu prenosovú funkciu 4. rádu:

$$U_{2d} = \frac{1}{p^4(b_4) + p^3(b_3) + p^2(b_2) + p(b_1) + b_0} \quad (7.3)$$

$$b_4 = (C_2 R_2 R_1 C_1 C_3 R_3 R_4 C_4), b_3 = (C_2 R_2 C_3 R_3 R_4 C_4 + C_2 R_2 R_1 C_1 C_3 R_3),$$

$$b_2 = (C_2 R_2 R_1 C_1 + C_3 R_3 R_4 C_4 + C_2 R_2 C_3 R_3), b_1 = (C_2 R_2 + C_3 R_3), b_0 = 1$$

Po matematickej úprave prenosovej funkcie filtru 4. rádu, ktorej vznik je vysvetlený v kap. 6 a dosadení koeficientov sme dostali nasledujúce rovnice:

$$\omega_0^4 C^4 R_1 R_2 R_3 R_4 = 1 \quad (7.4)$$

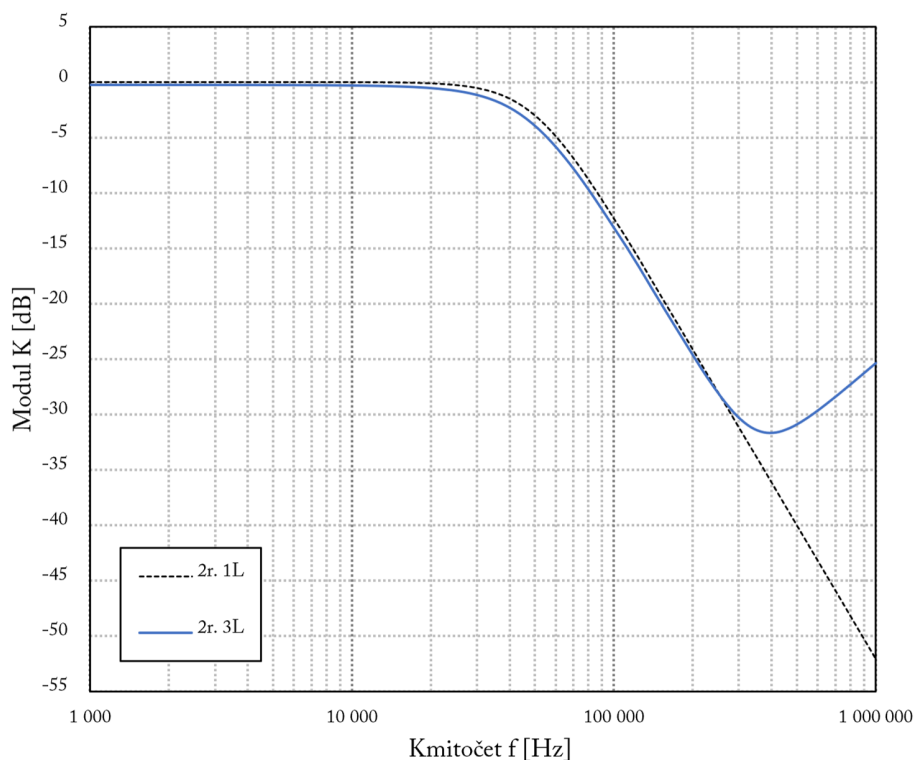
$$\omega_0^3 C^3 R_2 R_3 (R_1 + R_4) = 2,613$$

$$\omega_0^2 C^2 (R_1 R_2 + R_3 R_4 + R_2 R_3) = 3,414$$

$$\omega_0 C (R_2 + R_3) = 2,613.$$

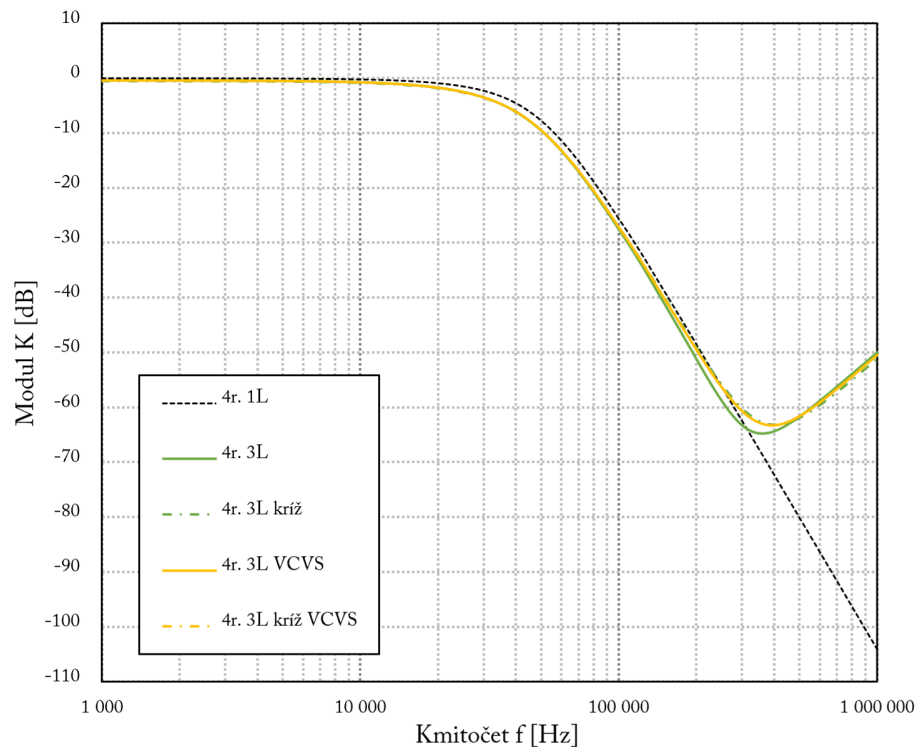
Pre počítačovú simuláciu v programe OrCAD bol zvolený hraničný kmitočet $f_0 = 50 \text{ kHz}$ a hodnoty kondenzátorov boli zvolené $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = 1 \text{ nF}$. Rezistory boli dopočítané ako $R_1 = 1723,57 \Omega$, $R_2 = 5884,53 \Omega$, $R_3 = 2437,13 \Omega$, $R_4 = 4161,62 \Omega$.

Simulácie prebehli v programe OrCAD, a to pri použití univerzálneho prúdového konvejuoru prvej a tretej generácie (UCC-1L, UCC-3L). Výsledky týchto simulácií môžeme vidieť na obr. 7.2 až obr. 7.5.



Obr. 7.2: Modulová charakteristika dolnej priepusti 2. rádu

Z grafu modulovej charakteristiky na obr. 7.2 je zrejmé, že sa simulovaný priebeh dolnej priepusti 2. rádu veľmi blíži teoretickému priebehu. Simulácia dosahuje útlm približne -30 dB a môžeme konštatovať, že sklon v nepriepustnom pásme je veľmi blízky ideálnemu sklonu, ktorý je -40 dB/dek, čo vychádza z teórie $N \cdot 20\text{dB}$ na dekádu.

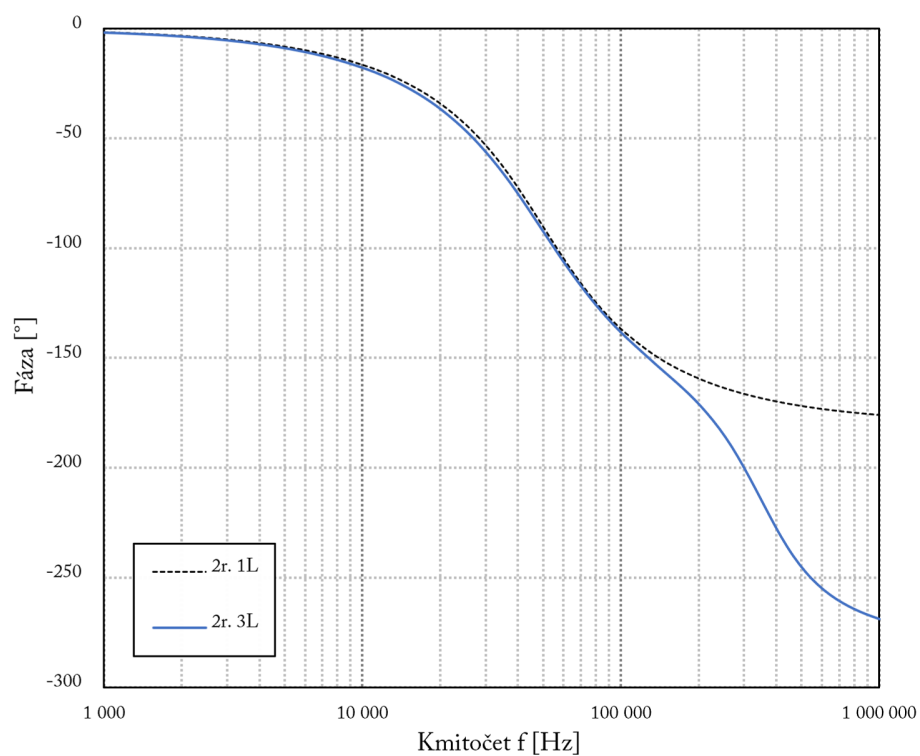


Obr. 7.3: Modulová charakteristika dolnej priepusti 4. rádu

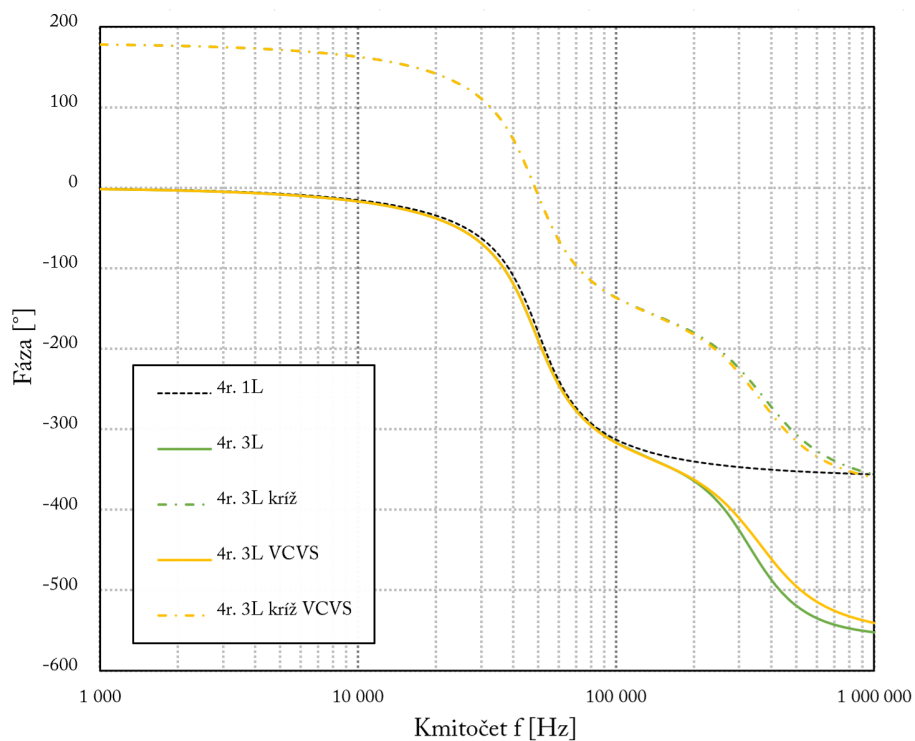
Z grafu simulácie pre 4. rád na obr. 7.3 môžeme vidieť, že aj tu sa simulácia celkom blíži ideálnemu prípadu s menšou odchýlkou. Najlepšie výsledky dosahuje priame kaskádové zapojenie s prvkom VCVS, podobne ako priame kaskádové zapojenie. Obidve dosahujú najlepší útlm skoro -70 dB. Tento útlm sa blíži k ideálnemu, ktorý je 80 dB, a teda simuláciu môžeme považovať za úspešnú. Veľmi podobné výsledky tiež dosahujú obidve varianty s kríženým prepojením.

Z grafu fázovej charakteristiky 2. rádu na obr. 7.4 môžeme vidieť sa simulácia blíži k ideálnemu priebehu s menšou odchýlkou, kedy vykazuje horšie vlastnosti od 100 kHz.

Pri fázovej charakteristike 4. rádu vidíme na obr. 7.5, že simulácia dosahuje podobné výsledky ako pri modulovej charakteristike a najlepšie výsledky opäť dosahuje priame zapojenie bez prvku VCVS a priame zapojenie s využitím prvku VCVS. Pri obidvoch variantách kríženého zapojenia je posunutie o 180° , čo je spôsobené prehodnotením kladného a záporného vstupu.



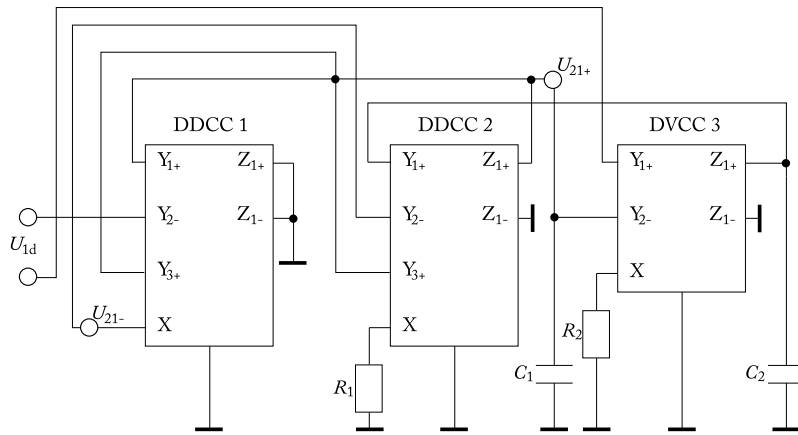
Obr. 7.4: Fázová charakteristika dolnej priepusti 2. rádu



Obr. 7.5: Fázová charakteristika dolnej priepusti 4. rádu

7.2 Pseudo-diferenčný filter pásmovej zádrže pracujúci v napäťovom režime

Návrh pseudo-diferenčného filtra v napäťovom režime sa nachádza na obr. 7.6. Pre tento návrh bol predlohou nediferenčný filter z [22], ktorý bol prerobený na pseudo-diferenčný filter, pridaním ďalších svoriek pre vstup a výstup a vhodne prepojený. V tomto zapojení sú využité dva diferenčne rozdielové prúdové konvejory DDCC a jeden diferenčný prúdový konvektor DVCC, kde je k DDCC 1 privedené kladné napätie a k DVCC 3 je privedené záporné napätie. Okrem toho štruktúra obsahuje ešte 4 pasívne prvky, a to konkrétne dva rezistory R_1, R_2 a dva kapacity C_1, C_2 . Na rozdiel od nediferenčných filtrov, potláča zložku súhlasného signálu.



Obr. 7.6: Navrhnutý pseudo-diferenčný filter pásmovej zádrže pracujúci v napäťovom režime

Ak zohľadníme ideálne vlastnosti aktívnych prvkov, potom bude pre filtračné funkcie druhého rádu pásmovej zádrže bude diferenčné výstupné napätie dané nasledujúcou rovnicou:

$$U_{21d} = \frac{p^2(R_1C_2R_2C_1) + 1}{p^2(R_1C_2R_2C_1) + p(R_2C_1) + 1} \quad (7.5)$$

Pre druhý rád platí:

Činiteľ akosti Q a uhlový charakteristický kmitočet ω_0 môžeme vyjadriť pomocou vzťahov

$$Q = \sqrt{\frac{R_1C_2}{R_2C_1}}, \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_1C_2R_2C_1}}. \quad (7.6)$$

Pre počítačovú simuláciu v programe OrCAD bol zvolený hraničný kmitočet $f_0 = 50 \text{ kHz}$ a činiteľ akosti $Q = 0,707$ (Butterworthová aproximácia) a hodnoty kondenzátorov boli zvolené $C_1 = C_2 = 1 \text{ nF}$. Rezistory boli dopočítané ako $R_1 = 2250 \Omega$, $R_2 = 4502 \Omega$.

Pre štvrtý rád platí:

Na výpočet hodnôt parametrov boli použité Butterworthove koeficienty, ktoré sa nachádzajú v tab. 7.1 a tab. 7.2.

Po kaskádovom zapojení filtra v programe Snap sme dostali nasledujúcu prenosovú funkciu 4. rádu:

$$\frac{1 + p^2(R_1 R_2 C_1 C_2) + p^3(R_2 C_1 R_3 R_4 C_4 C_3)}{p^4(b_4) + p^3(b_3) + p^2(b_2) + p(b_1) + b_0} \quad (7.7)$$

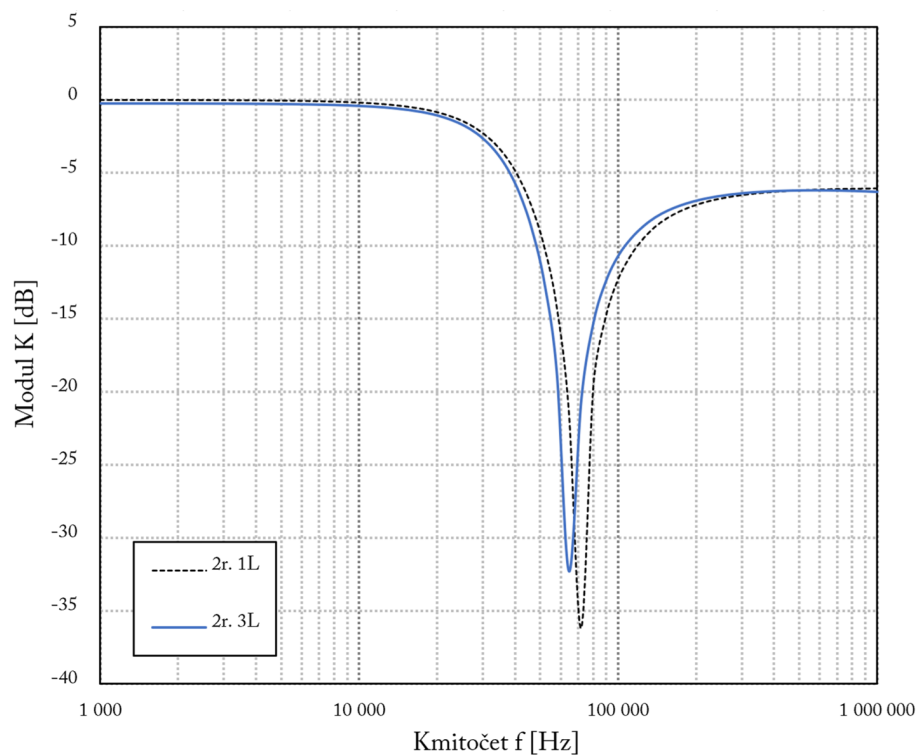
$$b_4 = (C_2 R_2 R_1 C_1 C_3 R_3 R_4 C_4), b_3 = (C_1 R_2 R_3 R_4 C_4 C_3 + R_1 R_2 C_1 R_4 C_4 C_2),$$

$$b_2 = (R_3 R_4 C_4 C_3 + R_2 C_1 R_4 C_4 + R_1 R_2 C_1 C_2), b_1 = (R_4 C_4 + R_2 C_1), b_0 = 1$$

Tento filter pre 4. rád nevyšiel matematicky správne, pretože sa vôbec neobjavil laplaceuv operátor p^4 , a z toho dôvodu nebolo možné pokračovať v ďalšej analýze. Podľa očakávaní mala prenosová funkcia vyjsť nasledovne:

$$\frac{1 + p^4(a_4)}{p^4(b_4) + p^3(b_3) + p^2(b_2) + p(b_1) + b_0} \quad (7.8)$$

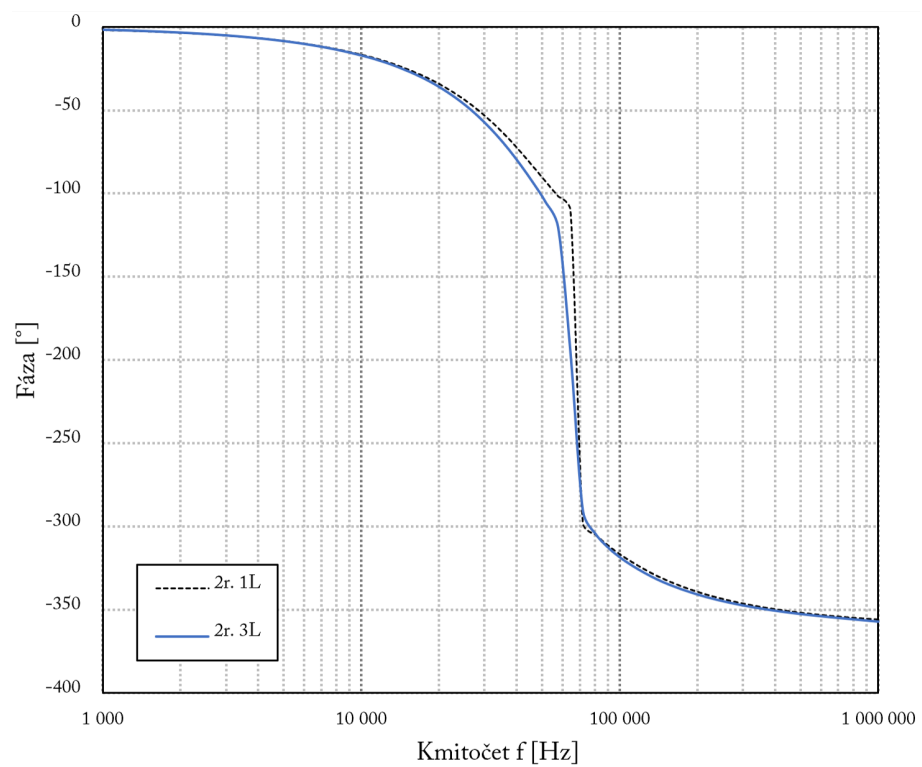
Simulácie pre 2. rád prebehli v programe OrCAD, a to pri použití univerzálneho prúdového konveju prvej a tretej generácie (UCC-1L, UCC-3L). Výsledky týchto simulácií môžeme vidieť na obr. 7.7 až obr. 7.8.



Obr. 7.7: Modulová charakteristika pásmovej zádrže 2. rádu

Táto simulácia ukázala, že filter nepracuje správne napriek tomu, že matematicky vyšiel v poriadku. Z grafu na obr. 7.7 je hneď na prvý pohľad vidieť, že hraničný kmitočet nie je 50 kHz ako by podľa výpočtu mal byť. Tiež môžeme vidieť zvláštne chovanie, kedy je po hraničnom kmitočte pásmová zádrž degradovaná na -6 dB.

Z grafu fázovej charakteristiky na obr. 7.8 pre tento filter vidíme, že simulovaná hodnota sa vôbec nezhoduje s očakávaným priebehom fázovej charakteristiky a celkovo filter vykazuje zlé vlastnosti, ktoré boli zistené až pri simulácii.



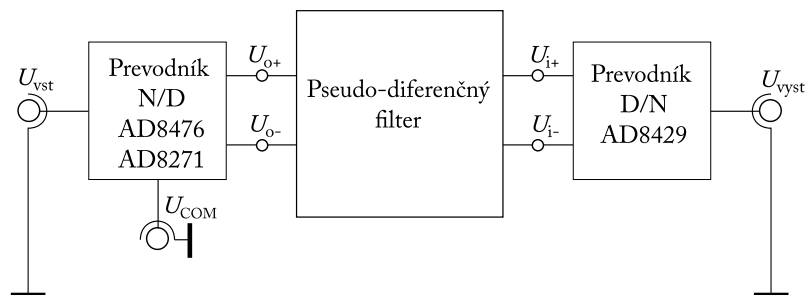
Obr. 7.8: Fázová charakteristika pásmovej zádrže 2. rádu

8 Experimentálne meranie

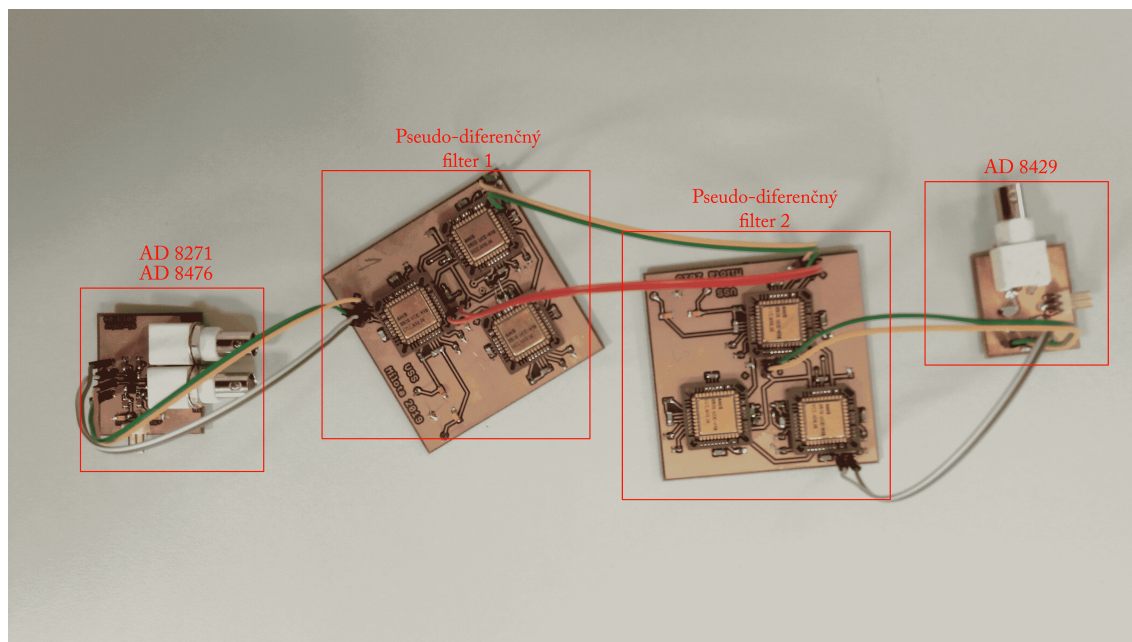
V tejto časti bakalárskej práce bol zhotovený a experimentálne odmeraný kmitočtvý pseudo-diferenčný filter pracujúci v napäťovom režime. V predošlej kapitole 7 boli celkovo navrhnuté dva takéto filtre, a to typu pásmová zádrž a dolná priepuť. Z týchto filtrov bol na experimentálne meranie vybraný filter typu dolná priepuť na základe lepších vlastností, ktoré dosahoval pri simuláciach v programe OrCAD. Na základe jeho schémy bola v freewarovom Cadsoft programe Eagle navrhnutá doska plošných spojov, kde samotný návrh a dokumentácia k doske je zobrazená v prílohe A. Následne bola doska spájkovaná a podrobená experimentálnu meraniu v laboratóriu.

Na meranie boli použité tri univerzálne prúdové konvejory UCC-N1B v podobe čipu [20]. Dva čipy boli transformované na rozdielový prúdový konvektor DDCC a jeden na prúdový konvektor druhej generácie CCII. K tomu, aby bolo možné meranie zrealizovať, keďže sa jedná o pseudo-diferenčný filter, bolo nutné previesť nediferenčné napätie na vstupe na diferenčné pomocou prevodníku so súčiastkou AD8476 [23] a AD8271[24]. Následne na výstupe previesť diferenčné napätie naspäť na nediferenčné pomocou prevodníku so súčiastkou AD8429 [25]. Doska a schéma týchto prevodníkov sa nachádza v prílohách B a C. Schéma zapojenia a obrázok pri meraní je zobrazená na obr. 8.1 a na obr. 8.2. Celé meranie prebehlo na obvodovom analyzátore Agilent 4395A a bolo realizované so vstupným signálom 0 dBm, šírkou pásma 30 Hz a v rozmedzí od 1 kHz do 1 MHz. Originálne merania sú znázornené v prílohe D.

Najprv meranie prebehlo s jednou doskou filtru 2. rádu a bolo zamerané na modulovú charakteristiku a fázovú charakteristiku, kde výsledné hodnoty boli porovnané s teoretickými hodnotami simulácií. Ďalej bola experimentálne odmeraná účinnosť potlačenia nežiadúcej súhlasnej zložky CMRR, účinnosť potlačenia nežiadúceho napájacieho signálu PSRR a charakteristika harmonického skreslenia navrhovanej štruktúry. Na meranie 4. rádu bolo využité kaskádové zapojenie dvoch dosiek 2. rádu za sebou podľa teórie v kapitole 6. Experimentálne zmerané boli varianty priameho a kríženého kaskádového zapojenia. V simuláciách bola otestovaná aj verzia zapojenia priamo a krížene s využitím prvku VCVS (Voltage controlled voltage source), ale tieto simulácie ukázali, že tento prvok nijako výrazne neovlivňuje chovanie navrhnutého filtru, a preto sa pri experimentálnom meraní nerealizovalo. Výsledky merania pri 4. ráde boli taktiež zamerané na modulovú charakteristiku, fázovú charakteristiku, účinnosť potlačenia nežiadúcej súhlasnej zložky CMRR, účinnosť potlačenia nežiadúceho napájacieho signálu PSRR a charakteristika harmonického skreslenia navrhovanej štruktúry.



Obr. 8.1: Bloková schéma zapojenia dosky pre experimentálne meranie

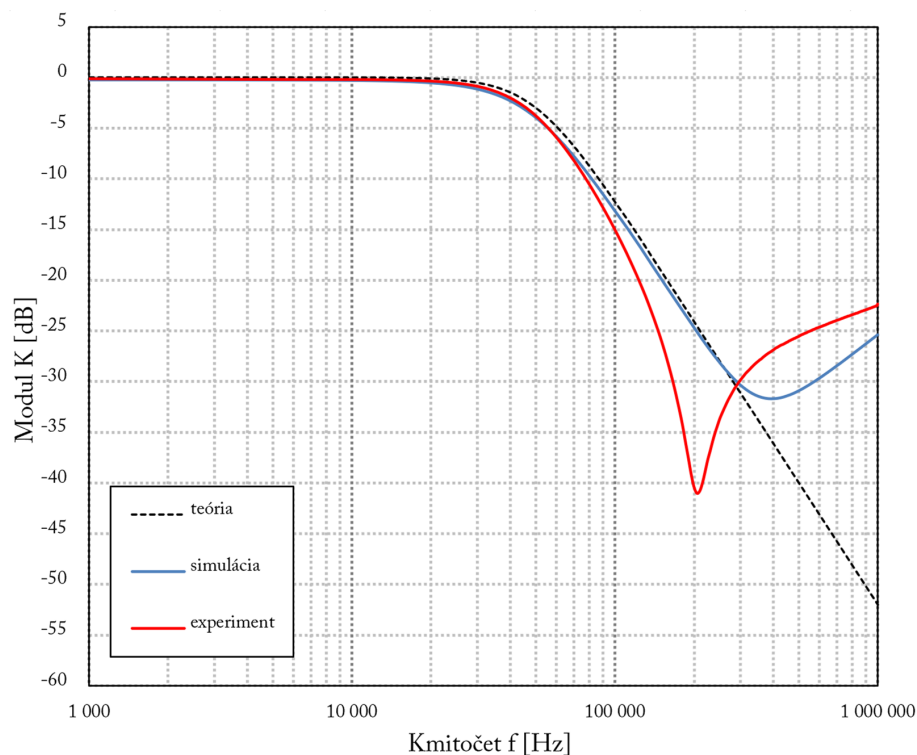


Obr. 8.2: Obrázok zapojenia dvoch dosiek do kaskády s prevodníkmi (priame zapojenie)

8.1 Výsledky merania a simulácií pseudo-diferenčného filtru typu dolná priepusť

8.1.1 Modulové charakteristiky

Pri pohľade na priebeh modulovej charakteristiky 2. rádu experimentálneho merania na obr. 8.3, môžeme povedať, že výsledok spĺňa očakávanie. Priebeh do hraničného kmitočtu 50 kHz kopíruje teoretický priebeh, ale následne má táto krivka strmší spád ako pri simulácii a teoretickom priebehu. Približne na kmitočte 200 kHz dosahuje útlm cez -40 dB, čo súhlasí s teóriou a je to oveľa lepší útlm ako bol dosiahnutý pri simulácii, ktorý bol približne -32 dB. Po kmitočte 200 kHz sa krivka experimentálneho priebehu prudko zdvíha, čo je spôsobené parazitnými vlastnosťami aktívneho

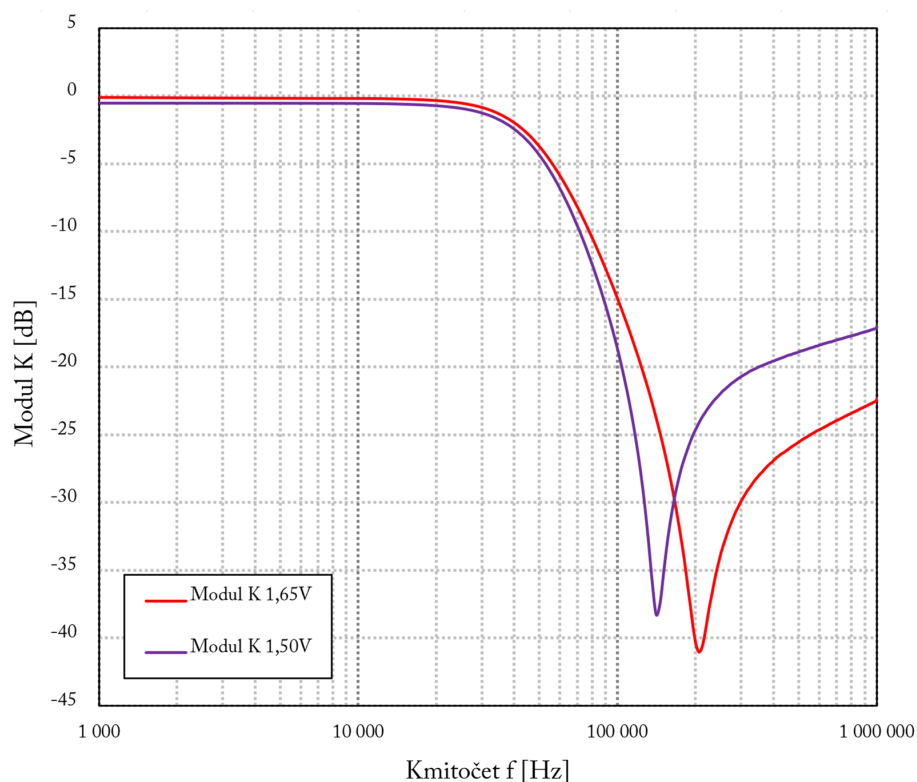


Obr. 8.3: Modulová charakteristika dolnej priepusti 2. rádu porovnanie experimentálneho priebehu so simulovaným a teoretickým priebehom

prvku, či neideálne parametre vstupných a výstupných svoriek.

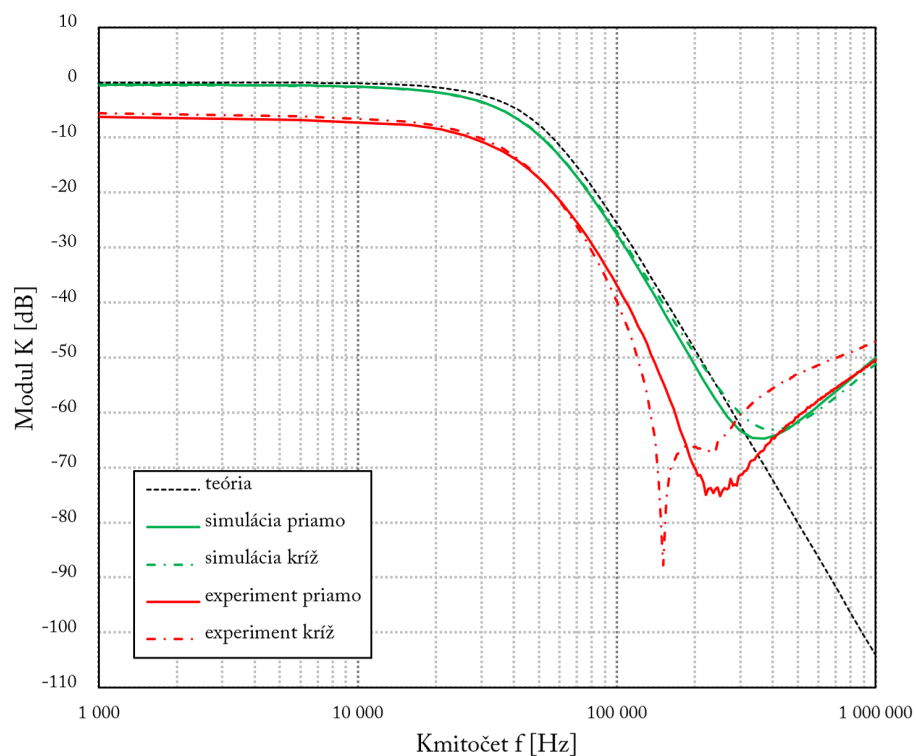
Graf na obr. 8.4 znázorňuje chovanie modulej charakteristiky filtru 2. rádu pri znížení vstupného napätia z ideálneho, ktoré je $\pm 1,65\text{ V}$ na ľubovoľne zvolených $\pm 1,50\text{ V}$, čo predstavuje pokles napätia o 9%. Na prvý pohľad je vidieť, že filter má pri znížení vstupného napätia horšie vlastnosti. Na začiatku je mierne utlmený približne na -1 dB , po prekročení hraničného kmitočtu má krivka strmší spád. Približne na kmitočte 150 kHz dosahuje útlm -38 dB , čo je horšie ako v prípade ideálneho napájania, kde útlm presahuje hodnotu -40 dB . Od kmitočtu 150 kHz pozorujeme veľmi strmý nárast krivky, priemerne o 5 dB vyšší ako pri napätí $\pm 1,65\text{ V}$.

Nasledujúci graf, ktorý je znázornený na obr. 8.5 znázorňuje experimentálny priebeh (červený) filtru 4. rádu pri priamom a kríženom zapojení dvoch dosiek 2. rádu. Experimentálny priebeh pri priamom a aj pri kríženom zapojení je na začiatku skoro rovnaký, a taktiež celkovo utlmený približne na -8 dB . Tento útlm môže byť spôsobený parazitnými vlastnosťami aktívneho prvku, či neideálnymi parametrami vstupných a výstupných svoriek. Priebeh pri priamom zapojení dosahuje na kmitočte 250 kHz útlm približne -75 dB , čo sa veľmi blíži k teoretickým hodnotám, kedy

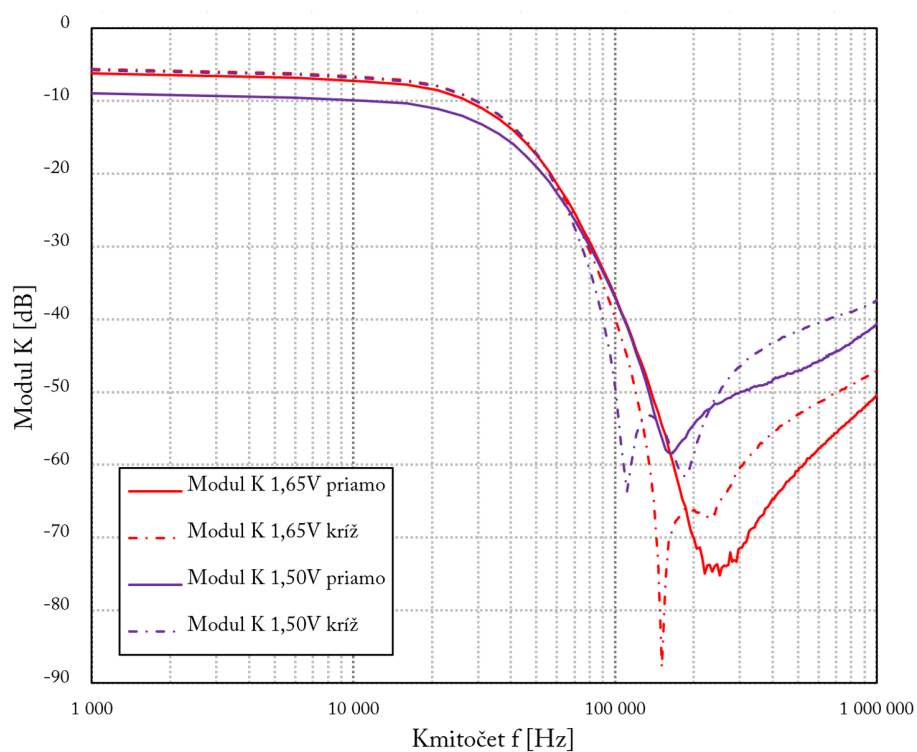


Obr. 8.4: Modulová charakteristika dolnej priepusti 2. rádu porovnanie priebehu pri znížení napätia na $\pm 1,50$ V

je útlm filtru 4. rádu -80 dB a je to lepší útlm ako filter dosahoval pri simulácii, čo bolo -65 dB. Následne po kmitočte 250 kHz vidíme nepriaznivé zdvihnutie krivky, ktoré však bolo očakávané na základe simulácie, s ktorou sa v tejto časti skoro zhoduje. Priebeh pri kríženom zapojení dosahuje približne na kmitočte 170 kHz útlm skoro -90 dB, ale po tomto kmitočte vykazuje priebeh veľmi zlé vlastnosti. Celkovo teda môžeme povedať, že oveľa lepší výsledok dosahuje priame zapojenie filtrov.



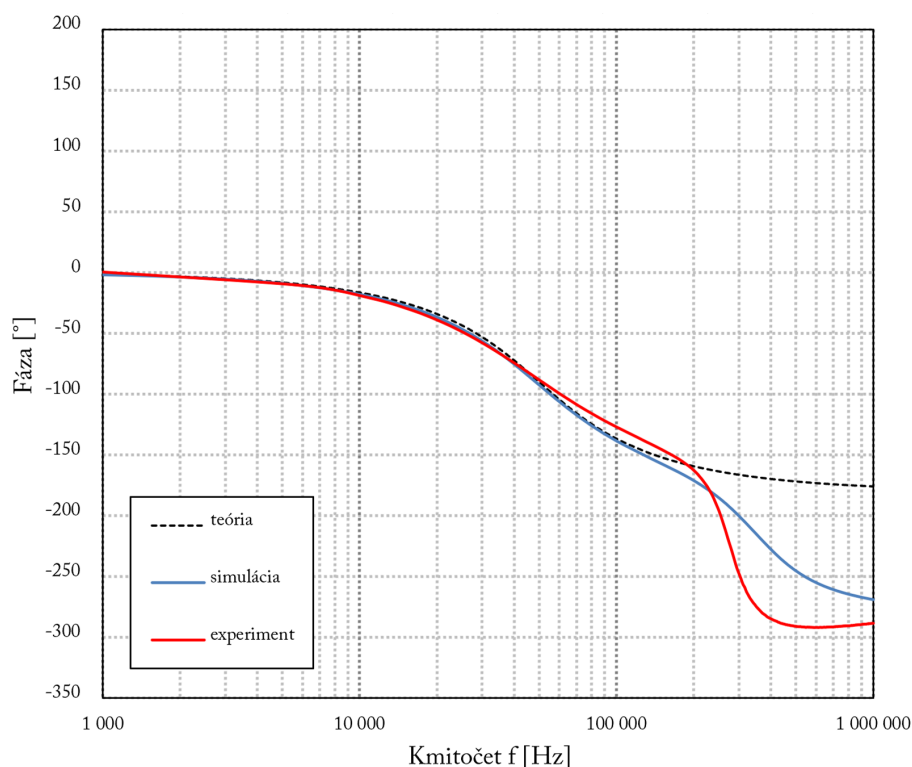
Obr. 8.5: Modulová charakteristika dolnej priepusti 4. rádu porovnanie experimentálneho priebehu so simulovaným a teoretickým priebehom



Obr. 8.6: Modulová charakteristika dolnej priepusti 4. rádu porovnanie priebehu pri znížení napätia na $\pm 1,50$ V

Tak ako pri 2. ráde modulovej charakteristiky, tak aj pri 4. ráde bolo experimentálne overené chovanie filtra pri znížení napájacieho napätia z ideálneho $\pm 1,65\text{ V}$ na $\pm 1,50\text{ V}$, čo predstavuje zníženie o 9%. Pribeh merania môžeme vidieť v grafe na obr. 8.6. Pri priamom zapojení sa zhoršenie chovania prejavilo hneď na začiatku, kde je priebeh utlmený skoro na -10 dB . Následne po prekročení hraničného kmitočtu 50 kHz dosahuje maximálny útlm len -69 dB približne na kmitočte 180 kHz , čo je zhoršenie oproti napájaciemu napätiu $\pm 1,65\text{ V}$ asi 16 dB . Pri zapojení krížom vykazoval priebeh krivky zlé vlastnosti už pri ideálnom napätí a dochádza tu k podobnému zhoršeniu ako pri priamom zapojení, až na to že pri kríženom zapojení nepozorujeme utlmenie na začiatku priebehu na -10 dB ako to je pri priamom zapojení.

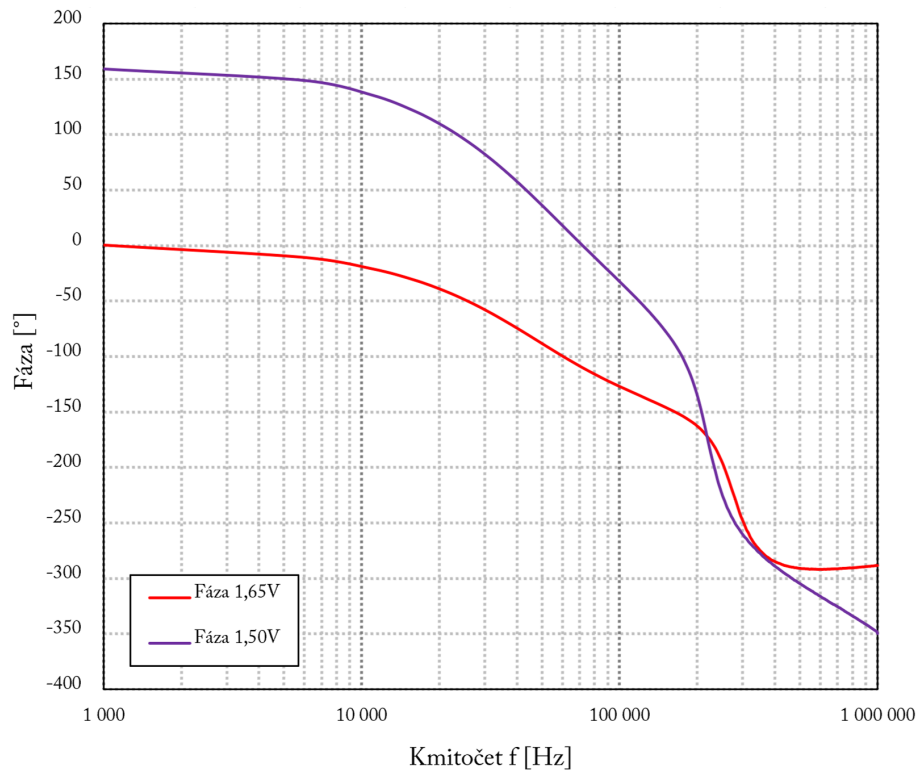
8.1.2 Fázové charakteristiky



Obr. 8.7: Fázová charakteristika dolnej priepusti 2. rádu porovnanie experimentálneho priebehu so simulovaným a teoretickým priebehom

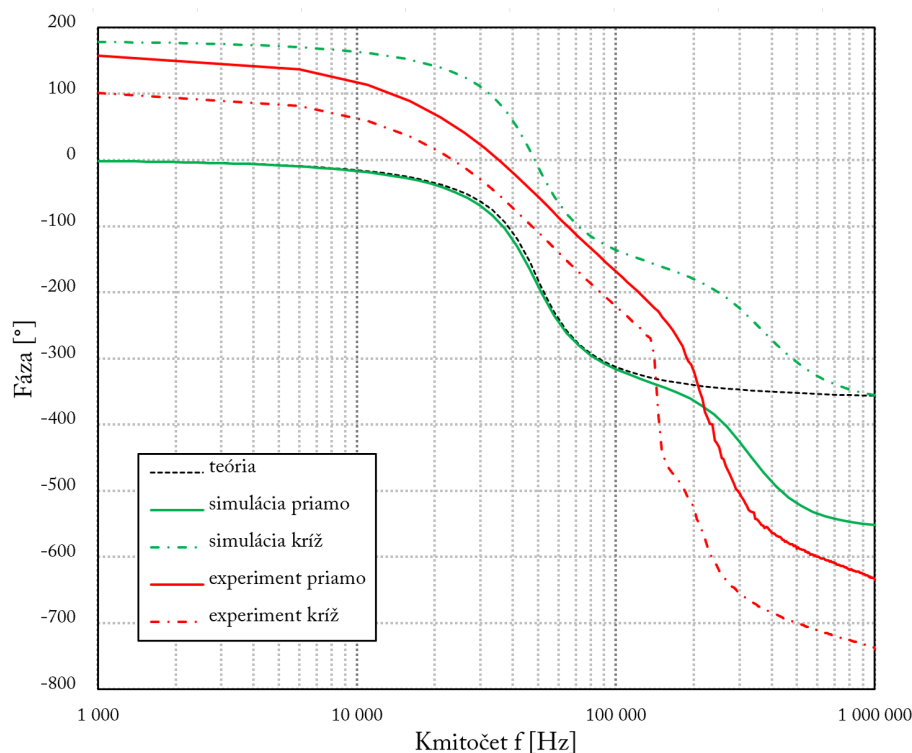
Graf, ktorý je na obr. 8.7 znázorňuje výsledky merania fázovej charakteristiky (červená). Priebeh experimentálneho merania dosahuje očakávané výsledky a do hraničného kmitočtu 50 kHz je totožný so simulovaným a teoretickým priebehom.

Po hraničnom kmitočte pozorujeme mierny fázový posun smerom k nule až do kmitočtu 200 kHz, kde krivka strmo klesne z hodnoty -150° až k -300° . Tento strmý pokles môže byť spôsobený nulou v prenose, čo môžeme pozorovať aj v modulovej charakteristike na obr. 8.3, kde sme sa na kmitočte 200 kHz dostali z útlmu -40 dB na nejakých -23 dB na kmitočte 1 MHz.



Obr. 8.8: Fázová charakteristika dolnej priepusti 2. rádu porovnanie priebehu pri znížení napätia na $\pm 1,50$ V

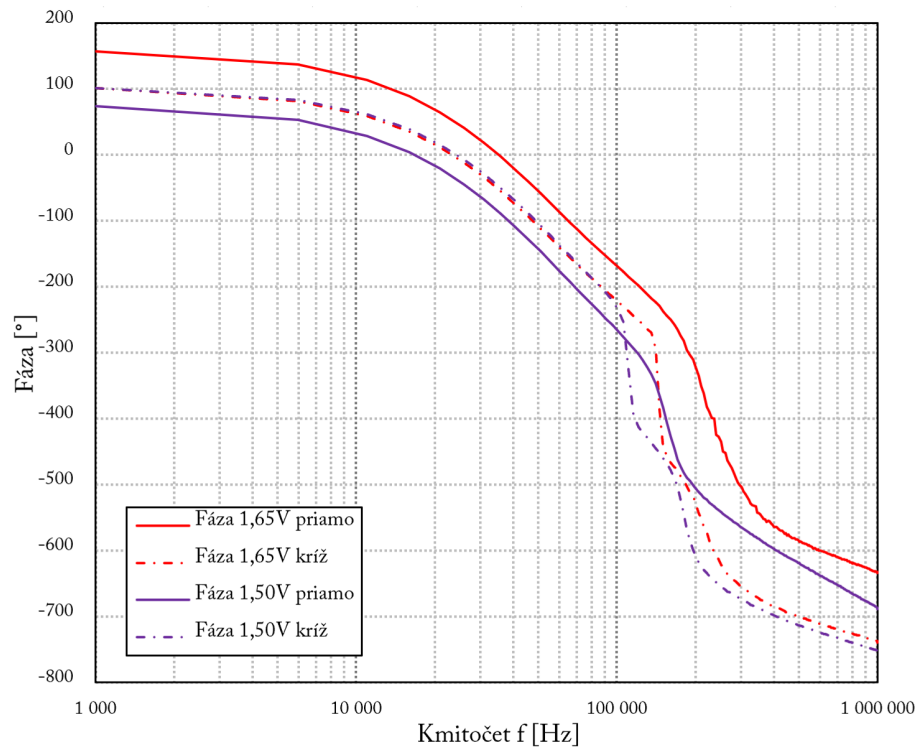
Na obr. 8.8 je znázornený graf fázovej charakteristiky 2. rádu s priebehom pri znížení napájacieho napätia o 9% (fialová) a priebeh pri ideálnom napätí (červená) na porovnanie správania filtra. Môžeme vidieť, že priebeh pri zníženom napájacom napätí vykazuje horšie vlastnosti a je na začiatku fázovo posunutý z 0° na hodnotu 150°



Obr. 8.9: Fázová charakteristika dolnej priepusti 4. rádu porovnanie experimentálneho priebehu so simulovaným a teoretickým priebehom

Fázová charakteristika pre 4. rád filtra na obr. 8.9 znázorňuje výsledky experimentálneho merania porovnané s teoretickými a simulovanými. Priebeh krivky priameho zapojenia je fázovo posunutý približne na hodnotu 150° oproti simulovanému a teoretickému priebehu krivky, ktoré začínajú na hodnote 0° . Tento priebeh sa celkovo líši a na kmitočte 200 kHz pozorujeme prudký pokles z hodnoty -300° až k hodnote -650° na kmitočte 1 MHz, ktorý už bol pozorovaný pri fázovej charakteristike 2. rádu na obr. 8.7. Priebeh krivky krížového zapojenia je veľmi podobný ako pri priamom zapojení, len je fázovo posunutý na hodnotu 100° a tiež sa celkovo líši od simulovaného a teoretického priebehu. Môžeme, preto skonštatovať, že pri kaskádovom zapojení tohoto filtra došlo pri 4. ráde fázovej charakteristiky k zhoršeniu priebehu.

Graf fázovej charakteristiky na obr. 8.10 znázorňuje zníženie napájacieho napätie z optimálnych $\pm 1,65\text{ V}$ o 9% na $\pm 1,50\text{ V}$ pri filtri 4. rádu. Pri priamom zapojení filtrov do kaskády môžeme vidieť fázový posun asi o 100° , zatiaľ čo pri krížovom zapojení vyzerá priebeh krivky veľmi podobne až do kmitočtu 100 kHz, kde nastal menší posun.

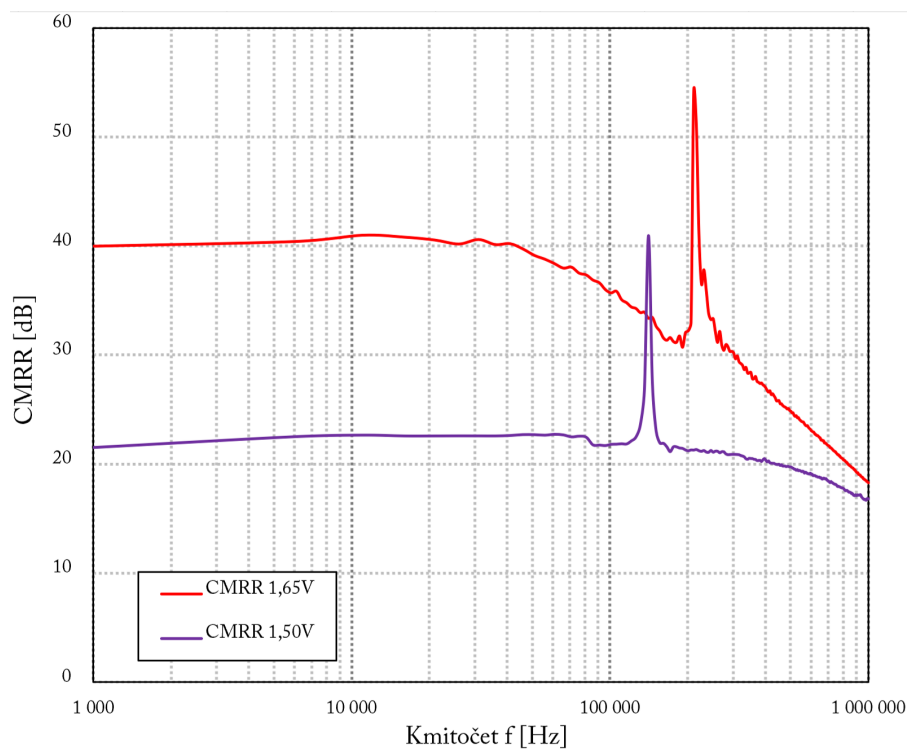


Obr. 8.10: Fázová charakteristika dolnej priepusti 4. rádu porovnanie priebehu pri znížení napätia na $\pm 1,50$ V

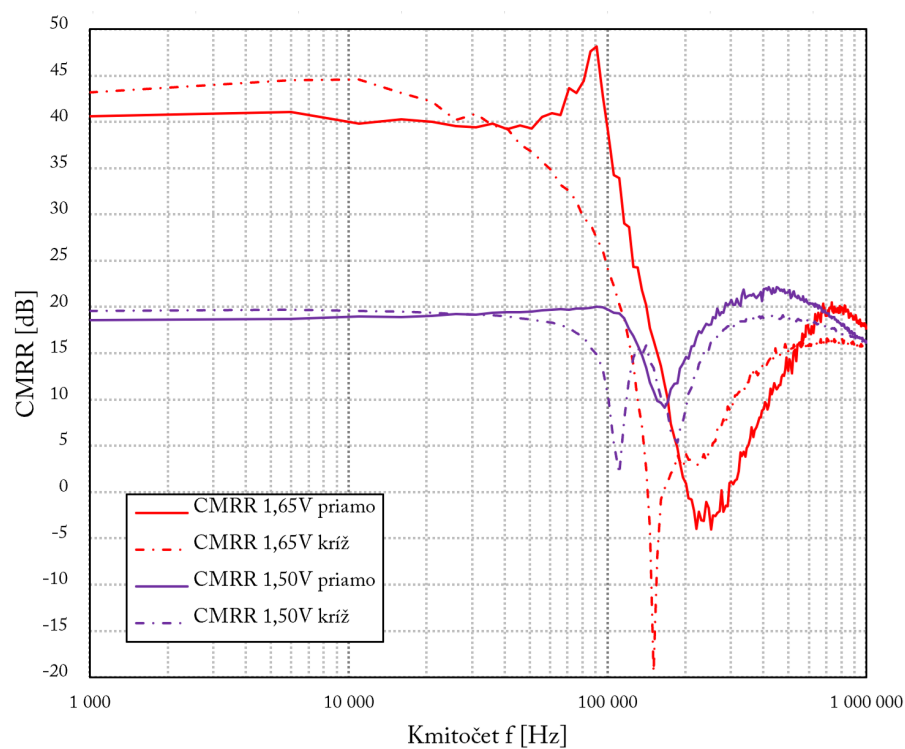
8.1.3 Schopnosť potlačenia súhlasného signálu

Výklad o potlačení súhlasného signálu CMRR (common mode rejection ratio) a jeho definícia sa nachádza v kapitole 3.2. Na obr. 8.11 je znázornená schopnosť filtra pri experimentálnom meraní potlačiť tento signál až o 40 dB pri optimálnom vstupnom napätí $\pm 1,65$ V, čo môžeme zhodnotiť ako dostatočné a považovať túto štruktúru za funkčnú. Pri znížení vstupného napätia o 9% na hodnotu $\pm 1,50$ V je schopnosť potlačiť tento signál zmenšená takmer o polovicu na hodnotu 22 dB.

Pri 4. ráde na obr. 8.12 je hodnota CMRR veľmi podobná. Priame prepojenie dvoch dosiek pri optimálnom vstupnom napätí dosahuje na hraničnom kmitočte 50 kHz hodnotu 40 dB, ktorá je zhodná s hodnotou pri druhom ráde. Krížené zapojenie pri optimálnom vstupnom napätí je síce na začiatku až na hodnote približne 43 dB, ale v bode hraničného kmitočtu kleslo toto potlačenie na hodnotu 37 dB. Zníženie vstupného napätia na hodnotu $\pm 1,50$ V sa prejavila veľmi podobne ako pri 2. ráde a to aj pri krížennom aj priamom zapojení a schopnosť potlačenia súhlasného signálu je takmer 20 dB.



Obr. 8.11: Schopnosť potlačenia súhlasného signálu dolnej priepusti 2. rádu pri optimálnom a zníženom napätí

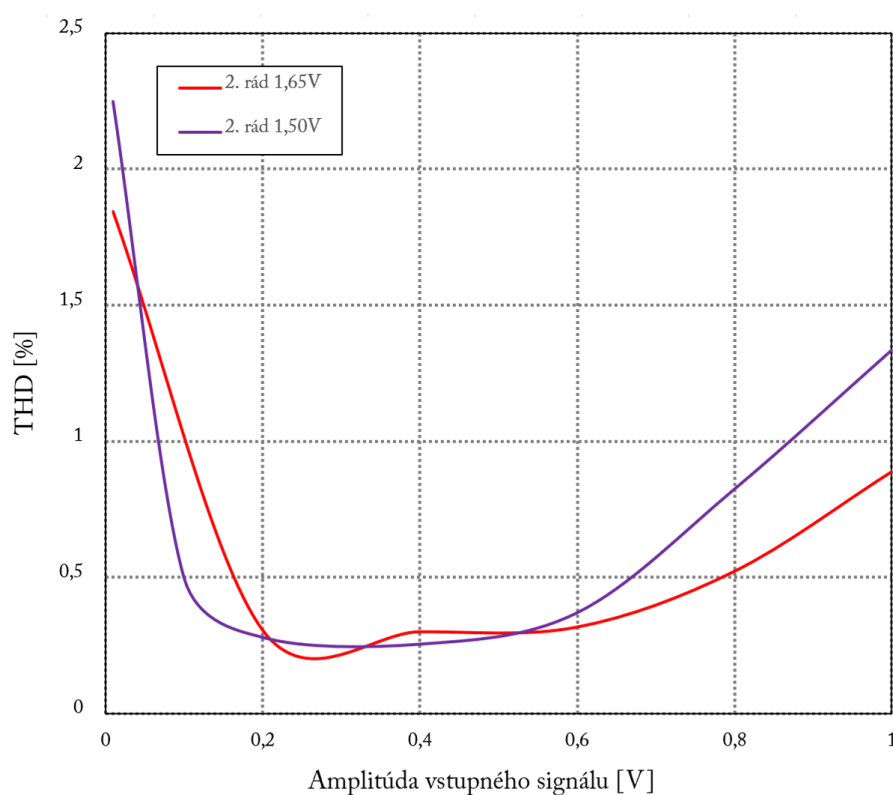


Obr. 8.12: Schopnosť potlačenia súhlasného signálu dolnej priepusti 4. rádu pri optimálnom a zníženom napätí

8.1.4 Celkové harmonické skreslenie

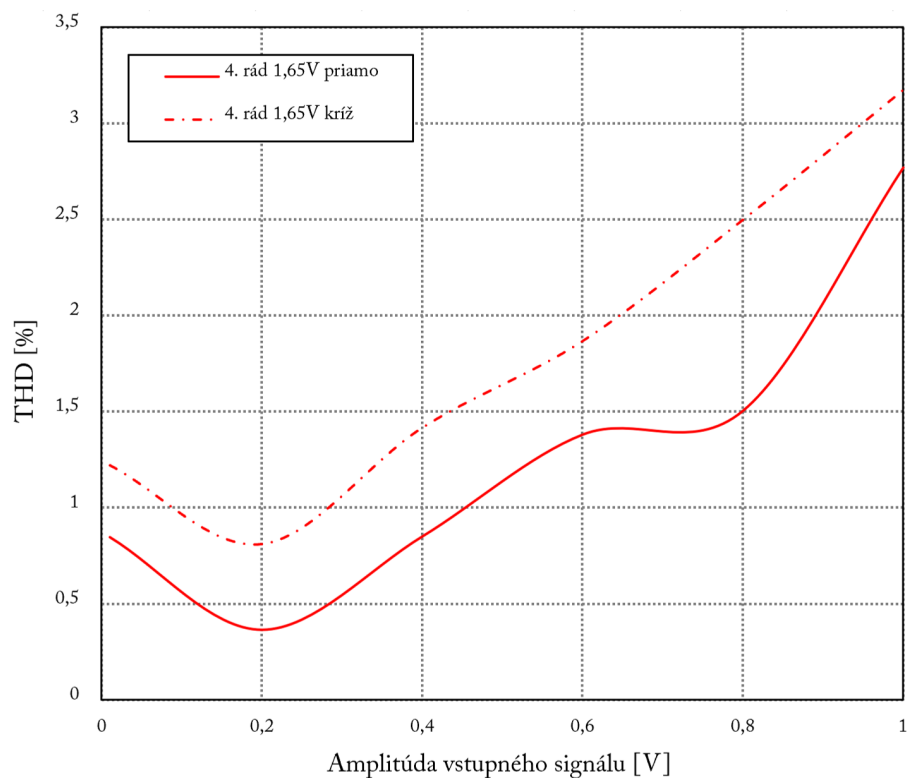
Celkové harmonické skreslenie THD (total harmonic distortion) je meranie harmonického skreslenia prítomného v signáli a je definované ako pomer súčtu výkonov všetkých harmonických zložiek k výkonu základnej frekvencie. V experimentálnom meraní bolo zahrnutých prvých päť harmonických zložiek U_1 až U_5 . Celkové THD bolo následne vypočítané z nameraných hodnôt podľa vzťahu:

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 \dots U_n^2}}{U_1} \quad (8.1)$$



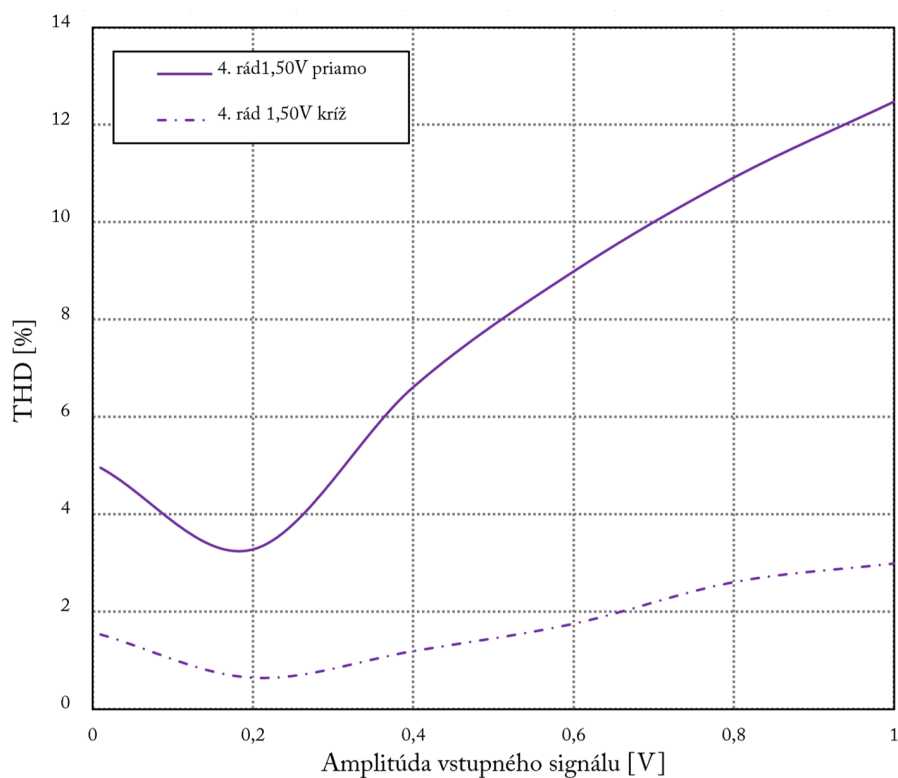
Obr. 8.13: Celkové harmonické skreslenie dolnej priepusti 2. rádu experimentálne meranie

Na prvom grafe harmonického skreslenia, ktorý je na obr. 8.13 filtru 2. rádu môžeme vidieť, že pri amplitúde vstupného signálu do 0,8 V je skreslenie pod 0,5%. Pri zníženom vstupnom napätí o 9% pozorujeme mierne zhoršenie a skreslenie pod 0,5% je približne do amplitúdy vstupného signálu 0,7 V. Následný percentuálny nárast harmonického skreslenia je spôsobený saturáciou aktívnych prvkov (konvektorov).



Obr. 8.14: Celkové harmonické skreslenie dolnej priepusti 4. rádu experimentálne meranie pri optimálnom napätí

Druhý graf celkového harmonického skreslenia filtru 4. rádu na obr. 8.14 dosahuje celkovo väčšie skreslenie. Pri priamom zapojení je do amplitúdy vstupného napätia 0,45 V skreslenie do 1%. Pri krížení je to pri rovnakej hodnote amplitúdy vstupného signálu do 1,5%. Následne vidíme pri oboch variantách zapojenia prudký nárast skreslenia zapríčinený saturáciou aktívnych prvkov (konvektorov) ako pri 2. ráde. V tomto prípade varianta priameho zapojenia filtrov dosahuje lepšie vlastnosti.



Obr. 8.15: Celkové harmonické skreslenie dolnej priepusti 4. rádu experimentálne meranie pri zníženom napätí o 9%

Na obr. 8.15 sa nachádza graf celkového harmonického skreslenia dolnej priepusti 4. rádu pri poklese vstupného napätia o 9% na hodnotu $\pm 1,50$ V. Priame zapojenie vykazuje výrazne zhoršené vlastnosti a na amplitúde vstupného signálu 0,45 V je skreslenie až 7%. Pri krížennom zapojení pozorujeme miernejšie skreslenie a až po hodnotu amplitúdy vstupného signálu 0,65 V je skreslenie do 2%.

9 Záver

Táto práca bola zameraná na návrh pseudo-diferenčných kmitočtových filtrov pracujúcich v napäťovom režime. V úvode práce sa zaoberám základnou problematikou a analýzou takýchto filtrov. Popisujem ich vznik a výhody, ktoré takéto zapojenie ponúka oproti úplne diferenčným a nediferenčným zapojeniam. Hlavnou náplňou tejto práce bol návrh dvoch pseudo-diferenčných kmitočtových filtrov 2. rádu, pri čom bol využitý program Snap a následnou analýzou v simulačnom programe OrCAD. Po procese simulovania pseudo-kmitočtových filtrov prebehla súhrnná analýza zapojenia filtra štyrmi spôsobmi kaskádového zapojenia, čím vznikol filter 4. rádu. Po analýze a porovnaní výsledkov modulovej a fázovej charakteristiky, malo najlepšie výsledky zapojenie bez využitia VCVS prvku, ktorý nemal výrazný vplyv na chovanie filtru. Zapojenie filtru pásmovej zádrže vykazovalo veľmi zlé výsledky pri simuláciach 2. rádu, a preto nebolo toto zapojenie kaskádovo prepojené na 4. rád. Matematicky bol filter navrhnutý správne. Druhý navrhnutý filter typu dolnej priepusti, dosahoval očakávané výsledky podľa teórie s menšou odchýlkou spôsobenou parazitnými vlastnosťami aktívnych prvkov a bolo možné s ním pokračovať aj ako s filtrom 4. rádu.

V časti experimentálneho merania bol filter typu dolná priepusť navrhnutý ako doska plošných spojov vo freewarovom Cadsoft programe Eagle a následne zostavený a experimentálne odmeraný. Celkovo boli vyrobené dva filtre 2. rádu dolnej priepusti a meranie prebehlo raz s jedným filtrom a potom s dvomi za sebou kaskádovo prepojenými filtrami, čím vznikol 4. rád. Experimentálne bolo overené priame a krížené zapojenie. Meranie prebehlo pri optimálnom vstupnom napätí $\pm 1,65$ V a potom aj pri zníženom napätí o 9% na $\pm 1,50$ V. Priebeh modulovej charakteristiky dopadol podľa očakávaní ako pri 2. ráde tak aj pri 4. ráde a filter dosahuje veľmi dobrý útlm za hraničným kmitočtom. Pri 4. ráde sa ukázala ako lepšia varianta priame zapojenie oproti kríženskému, ktoré malo horšie vlastnosti. Pri zníženom napätí pozorujeme pri všetkých priebehoch mierne horšie zhoršenie priebehov. Fázová charakteristika 2. rádu sa blíži k simulačnému priebehu a pri zníženom napätí o 9% prejavuje výrazný posun a zhoršenie priebehu. Pri 4. ráde dopadla fázová charakteristika výrazne horšie ako pri simuláciach. V tomto prípade bol priebeh priameho a krížového zapojenia veľmi podobný. Meranie schopnosti potlačenia súhlasného signálu CMRR dopadlo podľa očakávaní pri 2. ráde a rovnako aj pri 4. ráde s veľmi dobrou schopnosťou približne až 40 dB potlačiť tento nežiaduci signál. Pri poklese vstupného napätia o 9% je pokles potlačenia približne o polovicu ako pri optimálnom napätí pri 2. ráde ako aj pri 4. ráde. Priame zapojenie v tomto prípade dosahuje lepšie vlastnosti ako krížené. Filter bol testovaný aj na celkové harmonické skreslenie, kde pri 2. ráde filter vykazoval požadované vlastnosti, ale pri 4. ráde pozorujeme zhoršenie a celkovo

väčšie harmonické skreslenie. Pri znížení napájacieho napätia sa aj v tomto prípade prejavili od dosť horšie vlastnosti ako pri optimálnom napätí.

Celkovým zhodnotením experimentálneho merania sme dospeli k záveru, že navrhnutý pseudo-diferenčný kmitočtový filter typu dolná priepusť dosahoval dostatočné vlastnosti a môžeme ho považovať za funkčný, a zároveň pri zapojení dvoch takýchto filtrov za sebou sa ukázalo ako najvhodnejšie zapojenie priame.

Literatúra

- [1] DELIYANNIS, T., YICHUANG. SUN, FIDLER J.K. *Continuous-time active filter design*. Boca Raton, Fla.: CRC Press, c1999. ISBN 0849325730.
- [2] KOTON, J., VRBA. K. *Filtrační analogové obvody pro integrovanou výuku VUT a VŠB-TUO* [online]. 2014, Dostupné z URL: <<https://vut-vsb.cz/home/get-file?file=412>>
- [3] HÁJEK, K., SEDLÁČEK, J. *Kmitočtové filtry*, Technická literatura BEN, 2002, ISBN:80-7300-023-7.
- [4] KOTON, J., VRBA, K. *Filtrační analogové obvody pro integrovanou výuku VUT a VŠB-TUO* ,Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací 2014
- [5] Maxim integrated: *Understanding Single-Ended, Pseudo-Differential and Fully-Differential ADC Inputs*. Poslední aktualizace 14. 6. 2002, Dostupné z URL:<<https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/1108>>.
- [6] JEŘÁBEK, J. *Kmitočtové filtry s proudovými aktivními prvky*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2007. 70 s. Vedoucí doktorské práce prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.
- [7] CHEN, W. K. *The Circuits and Filters Handbook*, New York, CRC Press, 2003, 2.vydání.
- [8] SUN, Y. *Design of High Frequency Integrated Analogue Filters*, IET 2002.
- [9] KUBÍK, M. *Diferenční kmitočtové filtry s moderními aktivními prvky*. BRNO,2011. 74s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Ing. Jan Jeřábek
- [10] *Common-mode rejection ratio*. Elektronický časopis. Dostupné z URL:<<https://encyclopedia.thefreedictionary.com/Common-mode+rejection+ratio>>
- [11] *Power supply rejection ratio*. Elektronický časopis. Dostupné z:<<http://encyclopedia.thefreedictionary.com/Power+Supply+Rejection+Ratio>>
- [12] HORNG, J. V., WU, C. M., HERENC SAR, N., *Fully differential first-order allpass filters using a DDCC*, Indian J. Engineering and Materials Sciences21 (2014), 345-350.

- [13] IBRAHIM, M. A., KUNTMAN, H., *A Novel High CMRR High Input Impedance Differential Voltage-Mode KHN-Biquad Employing DO-DDCCs*, Int. J. Electron. Commun. - AEU 58(2004) 429-433.
- [14] SMITH, K. C., SEDRA, A. *The Current Conveyor: a New Circuit Building Block*. IEEE Proceedings, 1968, vol. 56, no. 8, p. 1368-1369.
- [15] SEDRA, A., SMITH, K. C. *A second-generation current conveyor and its applications*, IEEE Transactions on Circuit Theory, 1970, vol. 17, no. 1, pp. 132-134.
- [16] FABRE, A. *Third-generation current conveyor: a new helpful active element*. Electronics Letters, 1995, vol. 31, no. 5, p. 338-339.
- [17] ČAJKA, J., DOSTÁL, T., VRBA, K., *Nové názvosloví a sjednocující pohled na proudové konvejory* [online]. 28.5.2001, Dostupné z URL: <<http://www.elektrorevue.cz/clanky/01024/index.html>>
- [18] SLÁDOK, O., *Diferenční struktury lineárních obvodů s DDCC a DVCC*. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 65 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Jaroslav Koton, Ph.D
- [19] BECVAR, D., VRBA, K., ZEMAN, V., MUSIL, V. *Novel universal active block: a universal current conveyor*, In Proceedings of the IEEE International Symposium on Circuits and Systems - ISCAS'00, Geneva, Švajčiarsko, 2000, p. 471-474.
- [20] Datasheet UCC-N1B - Universal Current Conveyor (UCC) and Second-Generation Current Conveyor (CCII+/-), Brno University of Technology, On Semiconductor Ltd., Rev. 1, 2012
- [21] SLÁDOK, O., VELIC, L., KOTON, J., HERENCSÁR, N., *Pseudo-differential filter operating in current mode*. In 2018 10th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems. 2018. s. 252-257. ISBN: 978-1-5386-9361-2.
- [22] YUCE, E. *A single-input multiple-output voltage-mode second-order universal filter using only grounded passive components*, Indian Journal of engineering & Materials Sciences, 2017, vol. 24, pp. 97-106, Dostupné z URL: <<http://nopr.niscair.res.in/bitstream/123456789/42789/1/IJEMS%2024%282-%29%2097-106.pdf?fbclid>>

- [23] *AD 8476, Low Power, Unity Gain Fully Differential Amplifier & ADC Driver*, Datasheet, Analog Devices [online]. 2011. Dostupné z URL: <http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD876.pdf.>
- [24] *AD 8271, Programmable Gain Precision Difference Amplifier*, Datasheet, Analog Devices [online] 2009. Dostupné z URL: <http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8271.pdf.>
- [25] *AD 8429, 1 nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ Low Noise Instrumentation Amplifier*, Datasheet, Analog Devices [online] 2011. Dostupné z URL: <http://www.analog.com/static/imported-files/data_sheets/AD8429.pdf.>

Zoznam symbolov, veličín a skratiek

C	kapacitor [F]
CCI	prúdový konvektor prvej generácie
CCII	prúdový konvektor druhej generácie
CCIII	prúdový konvektor tretej generácie
DDCC	diferenčný rozdielový prúdový konvektor (differential difference current conveyor)
CMRR	common-mode rejection ratio
DP	dolná priepusť (Low-pass)
DVCC	diferenčný prúdový konvektor (differential voltage current conveyor)
f_0	hraničný kmitočet [Hz]
f_{\min}	minimálny kmitočet [Hz]
f_{\max}	maximálny kmitočet [Hz]
Hz	Hertz [Hz]
I_1	vstupný prúd [A]
I_2	výstupný prúd [A]
I_x	prúd na uzle X [A]
I_y	prúd na uzle Y [A]
I_z	prúd na uzle Z [A]
K_0	priepustné pásmo
$K_{(p)}$	prenosová funkcia
L	induktor [H]
PSRR	power supply rejection ratio
PZ	pásmová zádrž (band-reject)
Q	činiteľ akosti [-]
R	rezistor [Ω]
U_1	vstupné napätie [V]
U_2	výstupné napätie [V]
U_{1d}	diferenčné vstupné napätie [V]
U_{2d}	diferenčné výstupné napätie [V]
U_x	napätie na uzle X [V]
U_y	napätie na uzle Y [V]
U_z	napätie na uzle Z [V]
UCC	univerzálny prúdový konvektor (universal current conveyor)
UVC	univerzálny napäťový konvektor (universal voltage conveyor)
ω_0	uhľový kmitočet [s^{-1}]
π	Ludolfove číslo (3,1415926535 [-])

Zoznam príloh

A	Zapojenie pseudo-diferenčného filtra	61
B	Zapojenie prevodníku nediferenčného signálu na diferenčný	67
C	Zapojenie prevodníku diferenčného signálu na nediferenčný	69
D	Originálne obrázky z experimentálneho merania	71

A Zapojenie pseudo-diferenčného filtra

Zoznam použitých súčiastok:

$$R_1 = 36k\Omega \parallel 2.4k\Omega \text{ M0805}$$

$$R_2 = 10k\Omega \parallel 8.2k\Omega \text{ M0805}$$

$$R_3 = 8.2k\Omega \text{ M0805}$$

$$R_4 = 8.2k\Omega \text{ M0805}$$

$$R_5 = 4.7k\Omega \text{ M0805}$$

$$R_6 = 4.7k\Omega \text{ M0805}$$

$$R_7 = 8.2k\Omega \text{ M0805}$$

$$R_8 = 8.2k\Omega \text{ M0805}$$

$$R_9 = 8.2k\Omega \text{ M0805}$$

$$R_{10} = 8.2k\Omega \text{ M0805}$$

$$R_{11} = 4.7k\Omega \text{ M0805}$$

$$R_{12} = 1k\Omega \text{ M0805}$$

$$R_{13} = 1k\Omega \text{ M0805}$$

$$R_{14} = 1k\Omega \text{ M0805}$$

$$C_1 = 1nF \text{ C0805}$$

$$C_2 = 1nF \text{ C0805}$$

$$C_3 = 47\mu F \parallel 68nF \text{ C1206} \parallel \text{C0805}$$

$$C_4 = 47\mu F \parallel 68nF \text{ C1206} \parallel \text{C0805}$$

$$C_5 = 47\mu F \parallel 68nF \text{ C1206} \parallel \text{C0805}$$

$$C_6 = 47\mu F \parallel 68nF \text{ C1206} \parallel \text{C0805}$$

$$C_7 = 47\mu F \parallel 68nF \text{ C1206} \parallel \text{C0805}$$

$$C_8 = 47\mu F \parallel 68nF \text{ C1206} \parallel \text{C0805}$$

$$C_9 = 47\mu F \parallel 68nF \text{ C1206} \parallel \text{C0805}$$

$$C_{10} = 47\mu F \parallel 68nF \text{ C1206} \parallel \text{C0805}$$

$$C_{11} = 47\mu F \parallel 68nF \text{ C1206} \parallel \text{C0805}$$

$$C_{12} = 47\mu F \parallel 68nF \text{ C1206} \parallel \text{C0805}$$

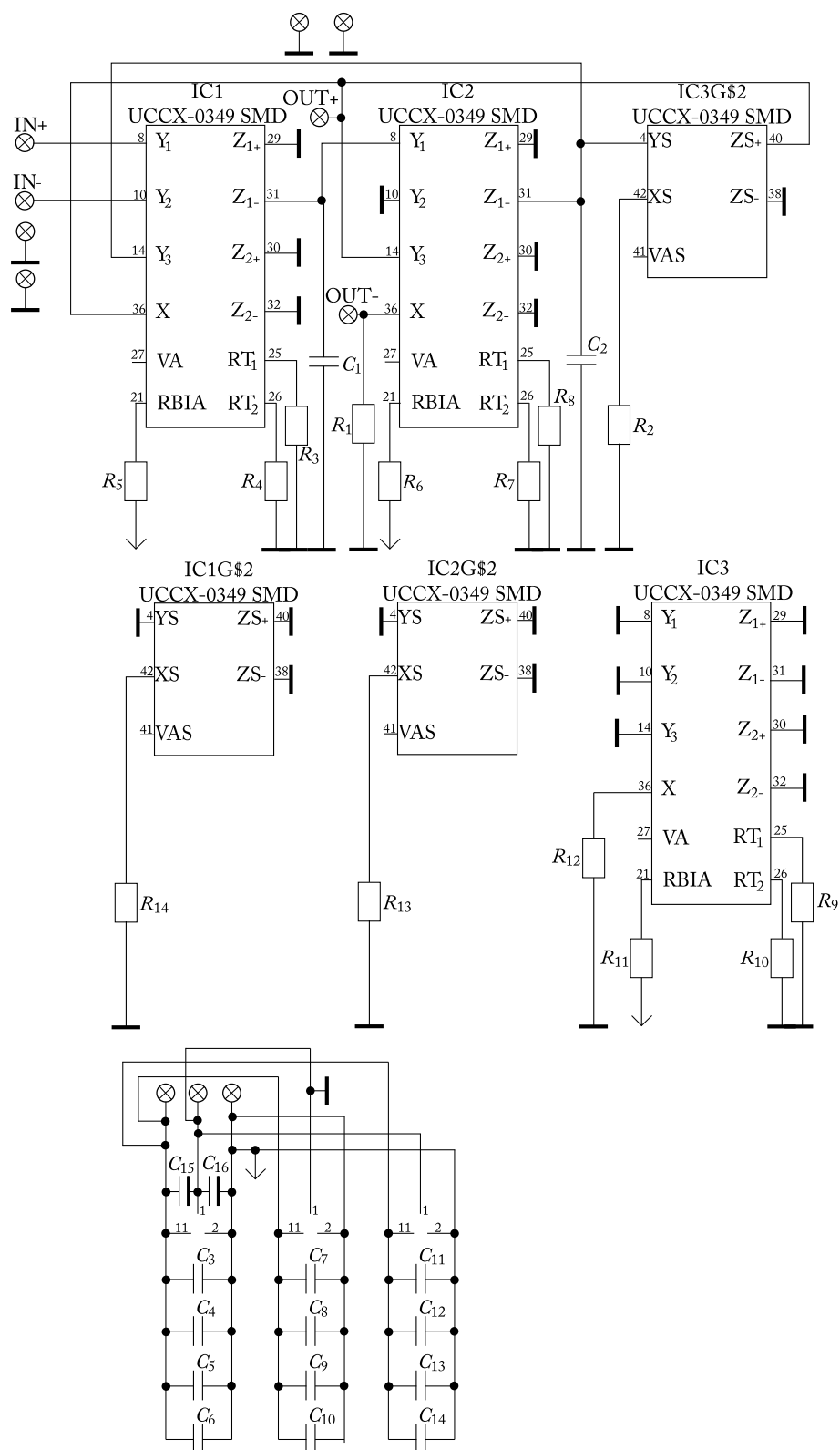
$$C_{13} = 47\mu F \parallel 68nF \text{ C1206} \parallel \text{C0805}$$

$$C_{14} = 47\mu F \parallel 68nF \text{ C1206} \parallel \text{C0805}$$

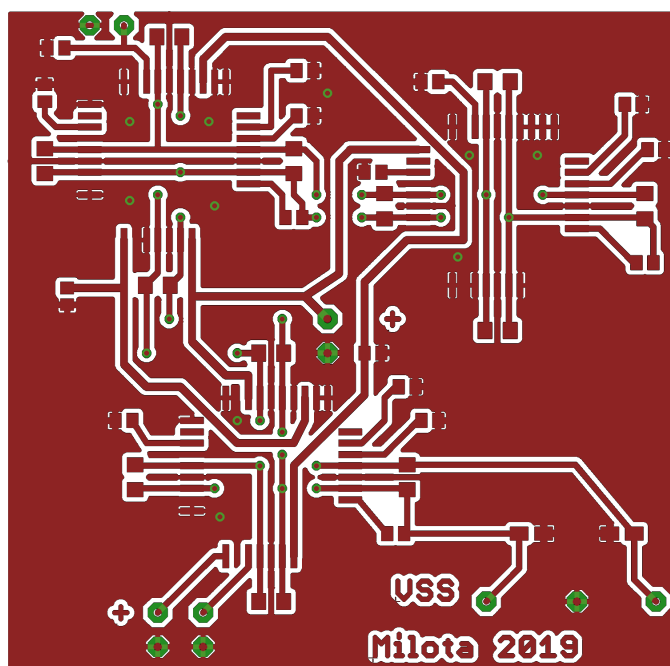
$$C_{15} = 4.7\mu F \text{ A/3216-18R}$$

$$C_{16} = 4.7\mu F \text{ A/3216-18R}$$

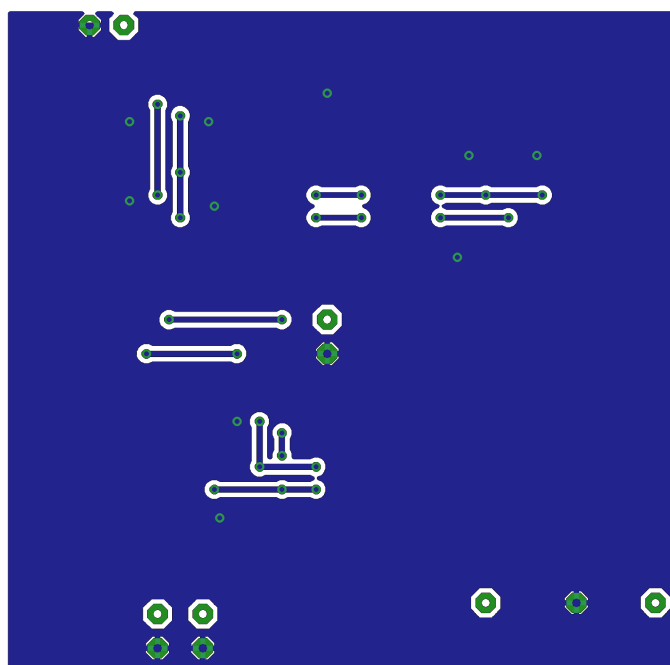
$$\text{UCC-N1B520 PLCCSM44 / 3x}$$



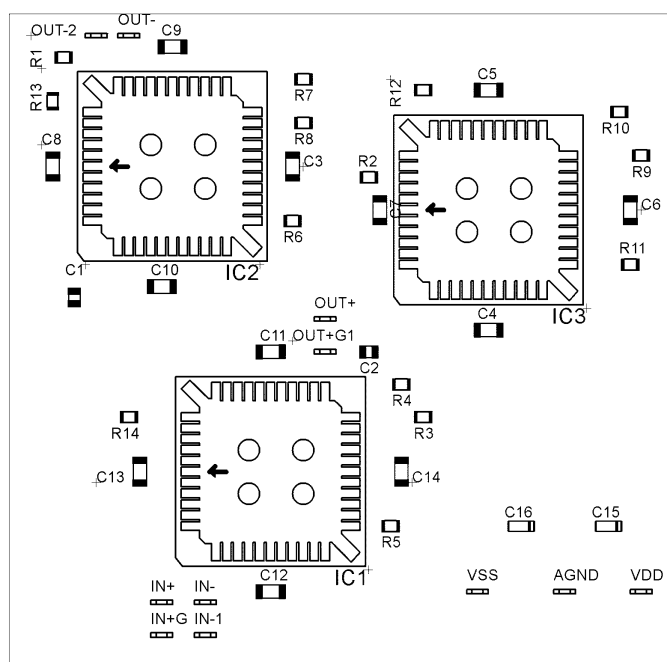
Obr. A.1: Bloková schéma dosky pre experimentálne meranie



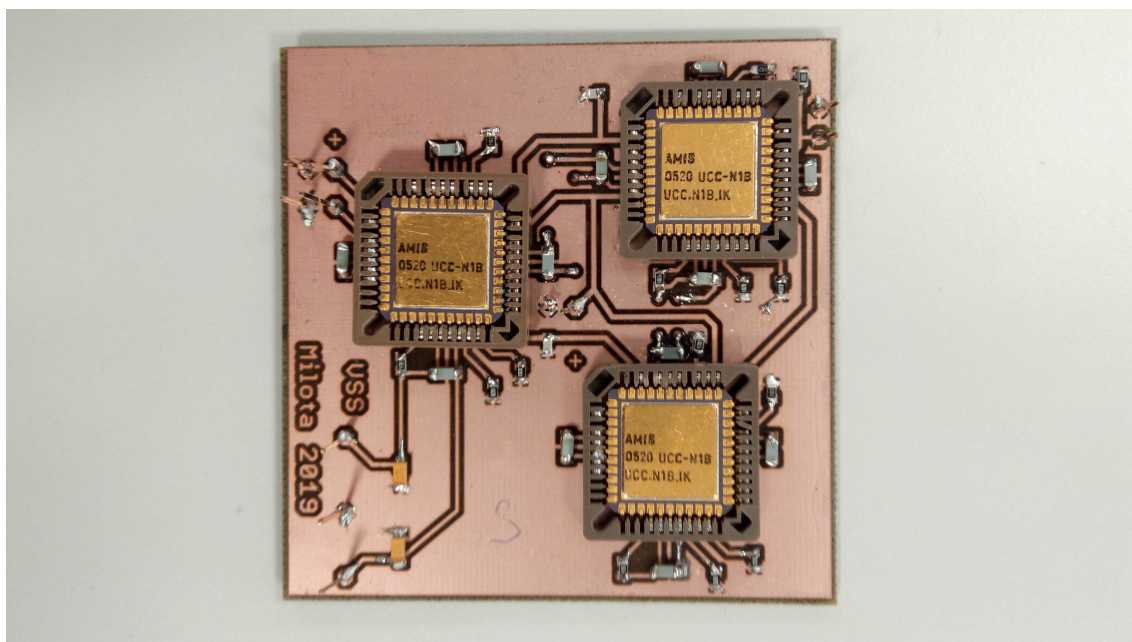
Obr. A.2: Návrh dosky plošných spojov (cesty zhora)



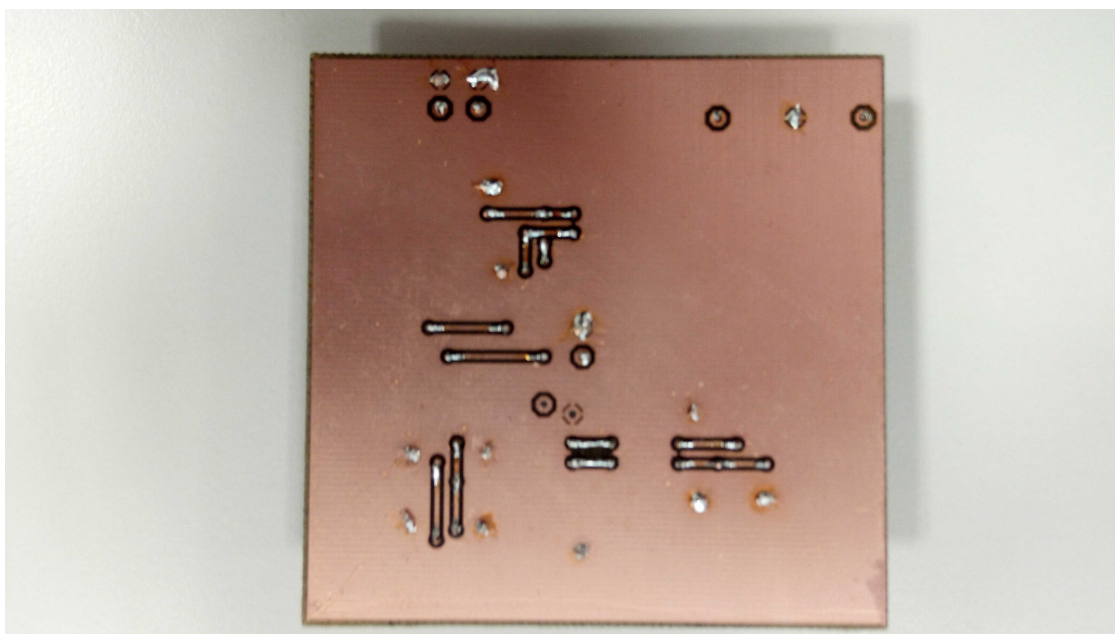
Obr. A.3: Návrh dosky plošných spojov (cesty zospodu)



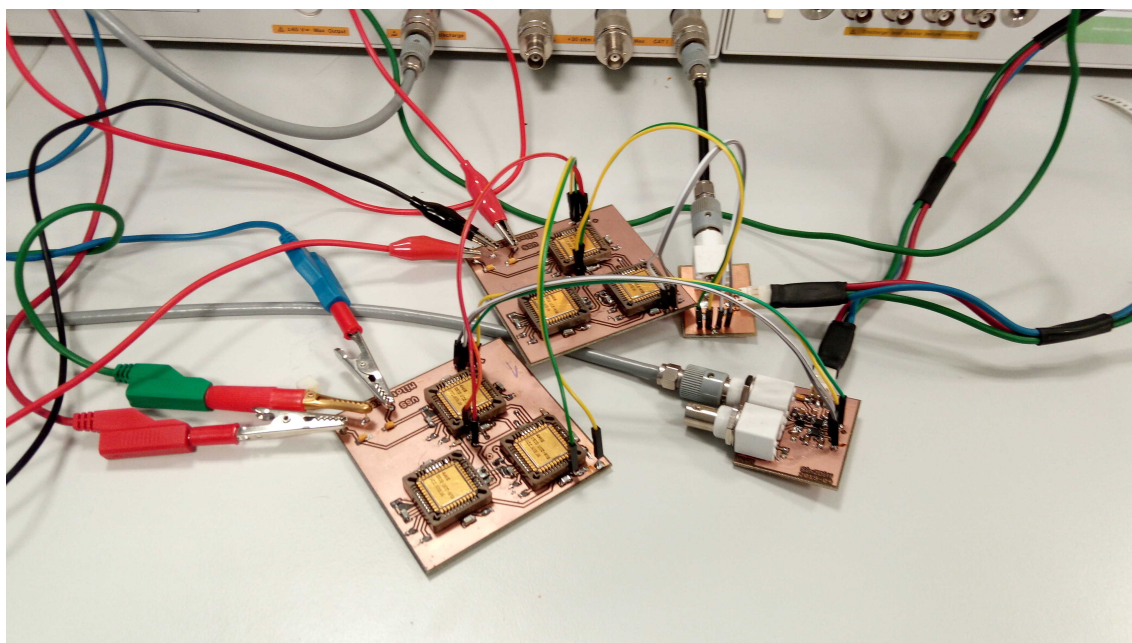
Obr. A.4: Návrh dosky plošných spojov (súčiastky)



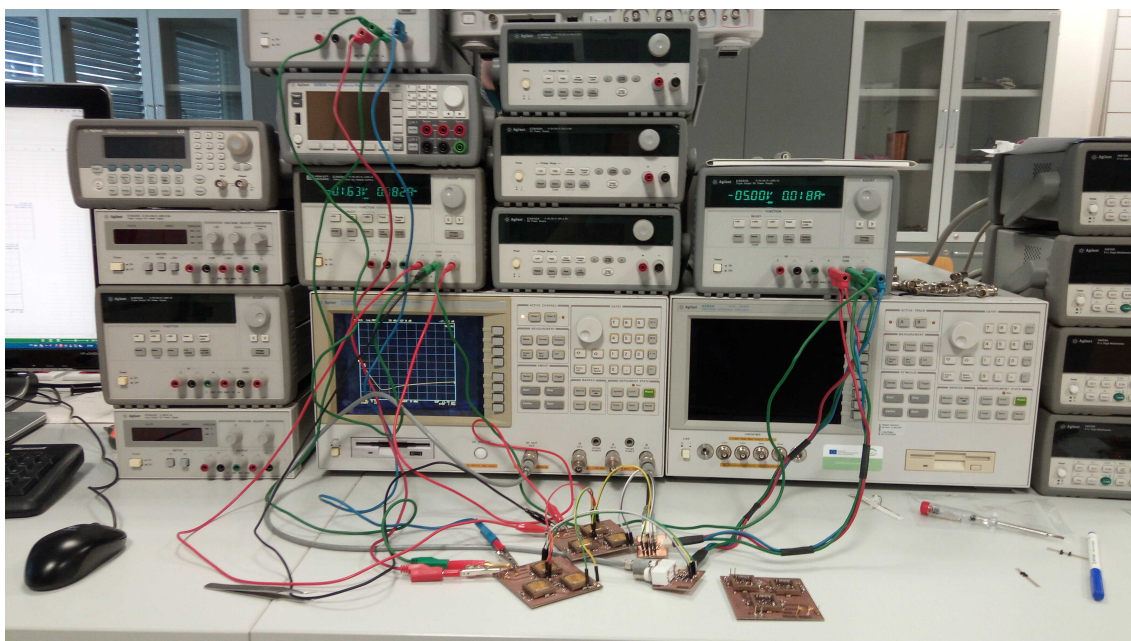
Obr. A.5: Obrázok dosky pseudo-diferenčného kmitočtového filtra typu dolná prie-
pust (pohľad zhora)



Obr. A.6: Obrázok dosky pseudo-diferenčného kmitočtového filtra typu dolná prie-
pust (pohľad zospodu)

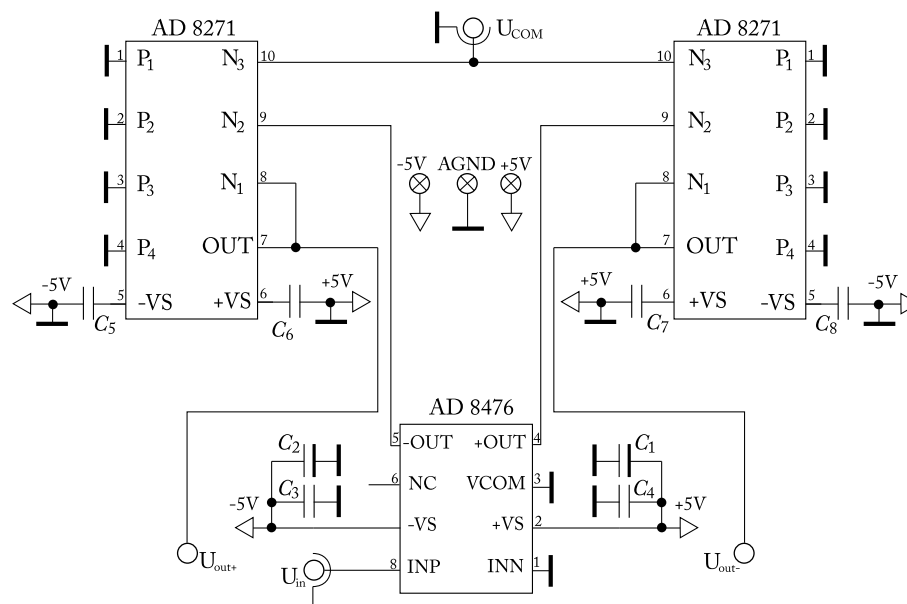


Obr. A.7: Obrázok celkového kaskádového zapojenia pseudo-diferenčných kmito-
vých filtrov na pracovisku



Obr. A.8: Obrázok celkového pohľadu na pracovisko so zapojenými doskami

B Zapojenie prevodníku nediferenčného signálu na diferenčný



Obr. B.1: Bloková schéma prevodníku nediferenčného signálu na diferenčný

Zoznam použitých súčiastok:

$C_1 = 10\mu F$ A/3216-18R

$C_2 = 10\mu F$ A/3216-18R

$C_3 = 0.1\mu F$ C0805

$C_4 = 0.1\mu F$ C0805

$C_5 = 0.1\mu F$ C0805

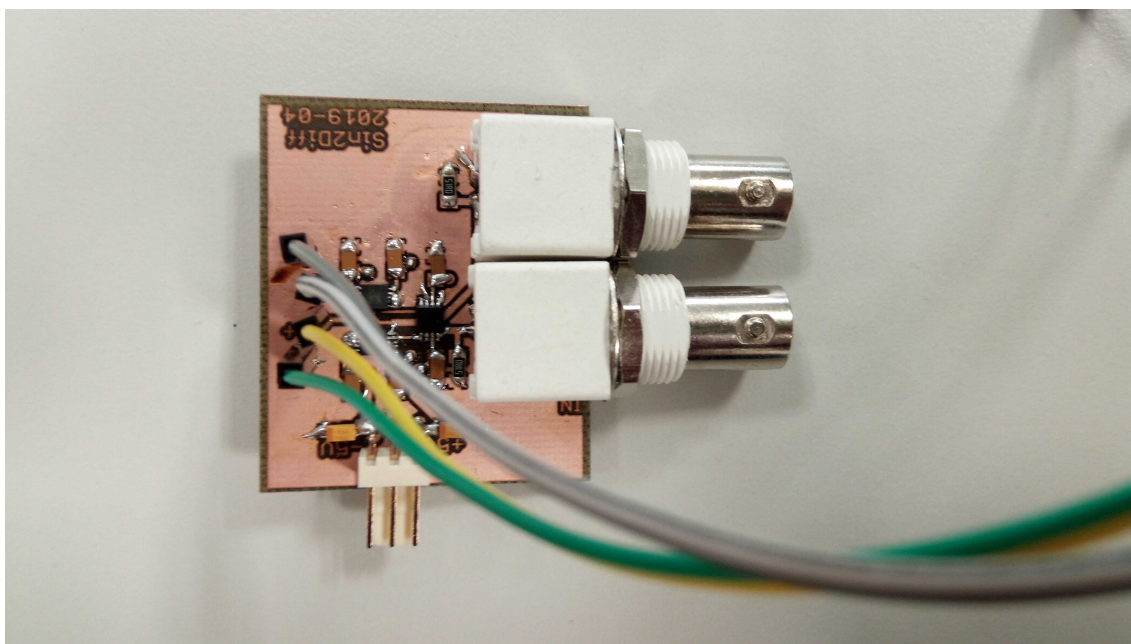
$C_6 = 0.1\mu F$ C0805

$C_7 = 0.1\mu F$ C0805

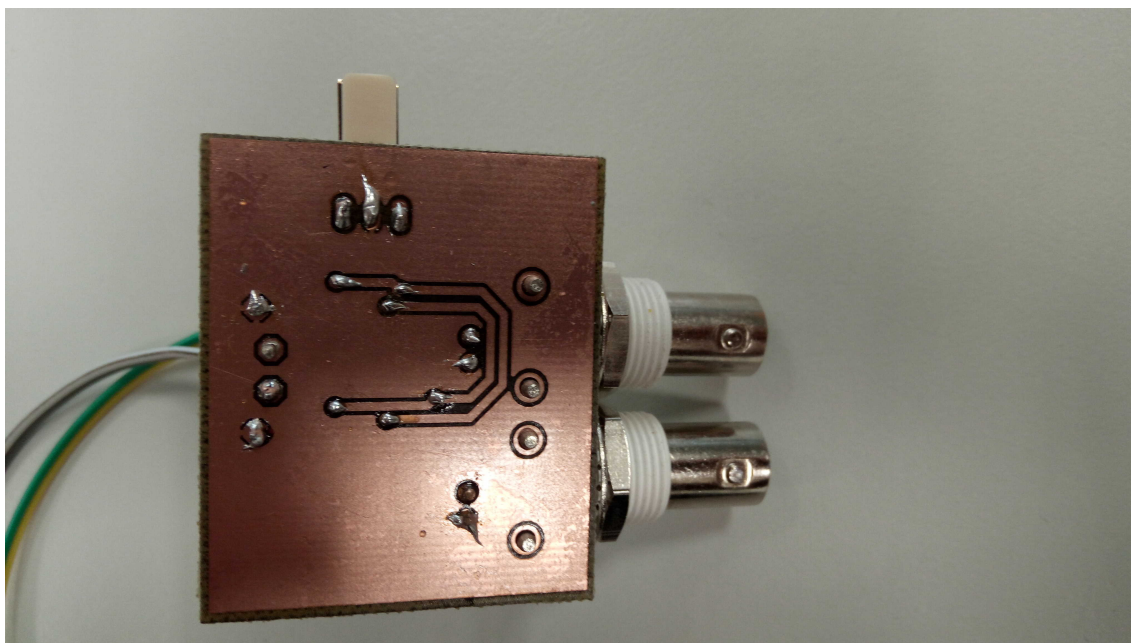
$C_8 = 0.1\mu F$ C0805

AD8476 MSOP8

AD8271 MSOP10 / 2x

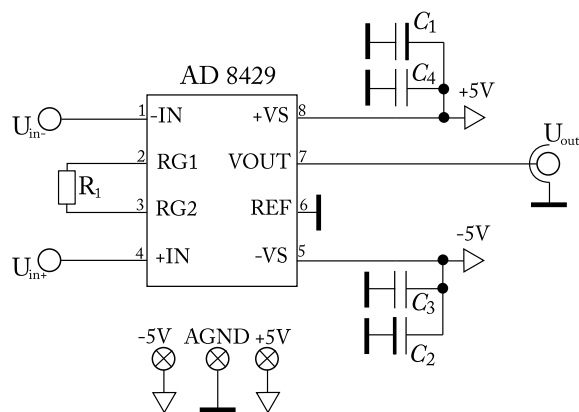


Obr. B.2: Obrázok dosky prevodníku nediferenčného signálu na diferenčný (pohľad zhora)



Obr. B.3: Obrázok dosky prevodníku nediferenčného signálu na diferenčný (pohľad zospodu)

C Zapojenie prevodníku diferenčného signálu na nediferenčný



Obr. C.1: Bloková schéma prevodníku diferenčného signálu na nediferenčný

Zoznam použitých súčiastok:

$R_1 = 0\Omega$ (zosílenie1), ak $R_1 = 6k\Omega$ (zosílenie2) M0805

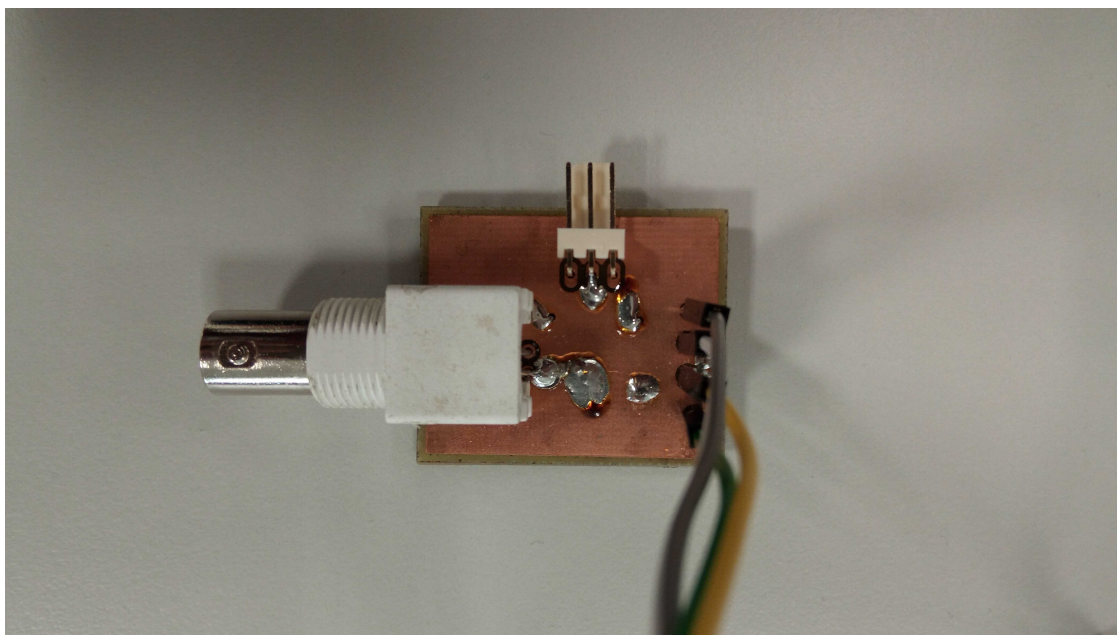
$C_1 = 10\mu F$ A/3216-18R

$C_2 = 10\mu F$ A/3216-18R

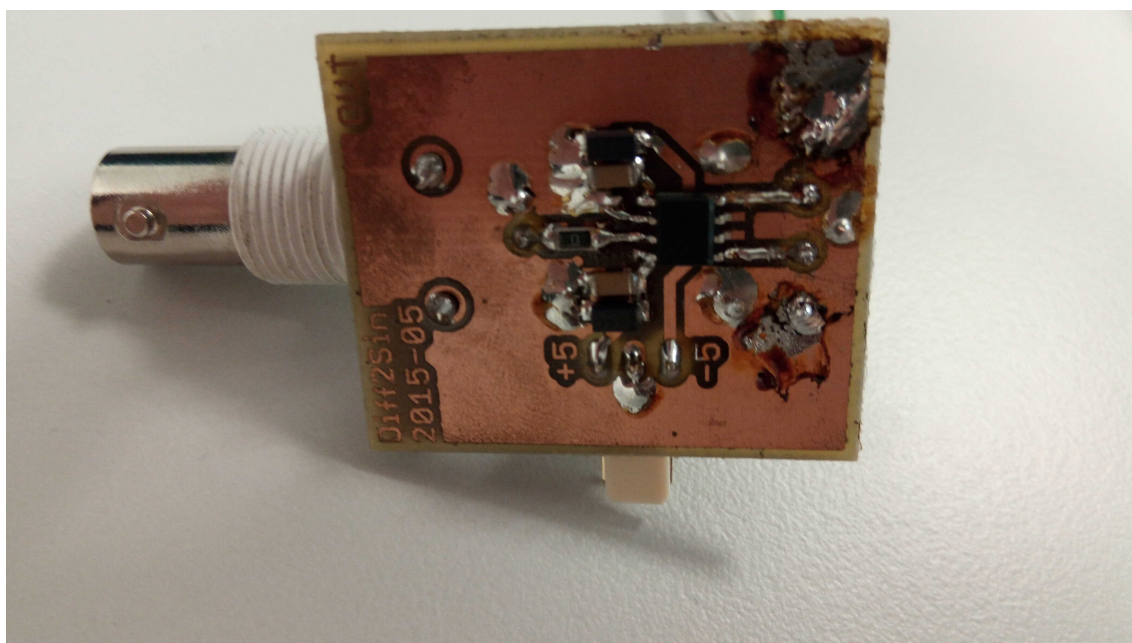
$C_3 = 0.1\mu F$ C0805

$C_4 = 0.1\mu F$ C0805

AD8429 SOIC8



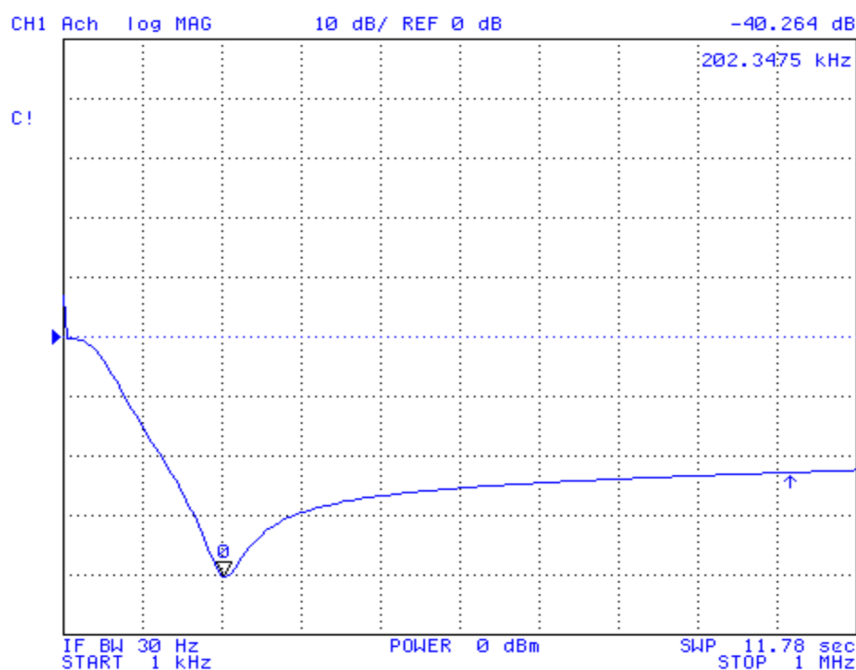
Obr. C.2: Obrázok dosky prevodníku diferenčného signálu na nediferenčný (pohľad zhora)



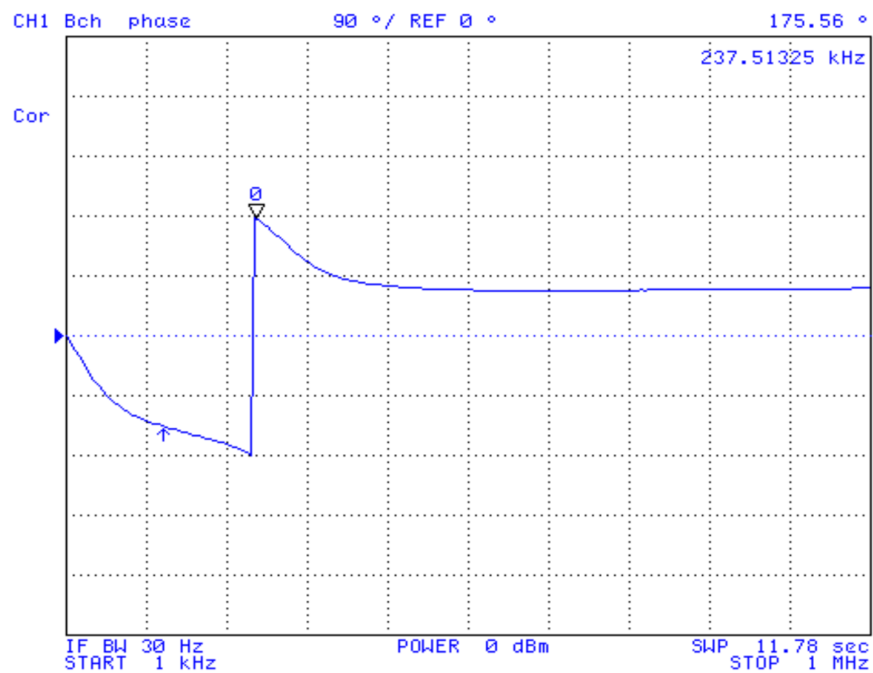
Obr. C.3: Obrázok dosky prevodníku diferenčného signálu na nediferenčný (pohľad zospodu)

D Originálne obrázky z experimentálneho merania

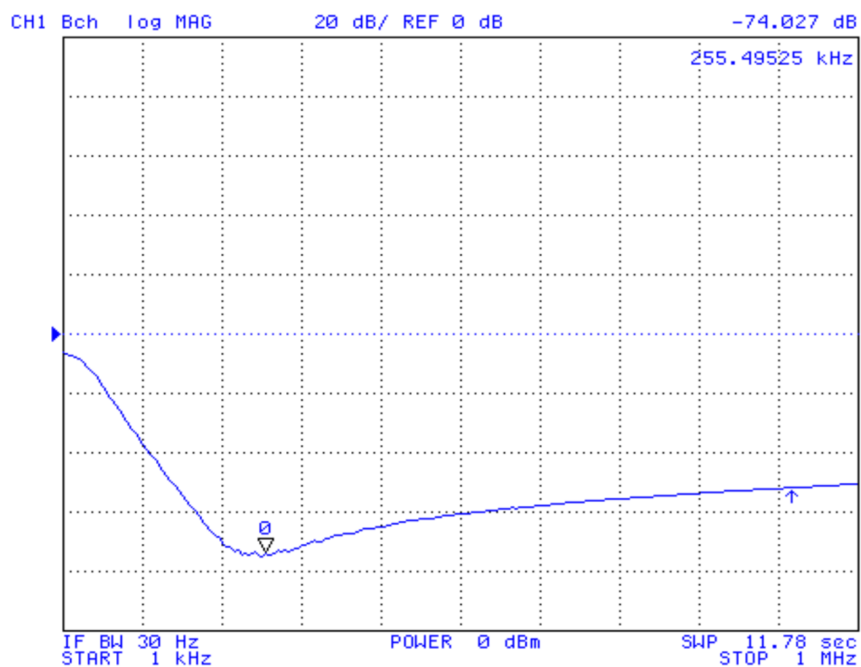
V tejto prílohe sa nachádzajú originálne obrázky z obvodového analyzátoru 4395 A získané pri meraní. Je tu zobrazená modulová a fázová charakteristika pri optimálnom vstupnom napätí $\pm 1,65$ V pre pseudo-diferenčný filter dolnej priepusti 2. a 4. rádu a spektrum signálu pre výpočet celkového harmonického skreslenia. Zvyšné originálne obrázky z merania sú spolu s ostatnými prílohami na priloženom CD.



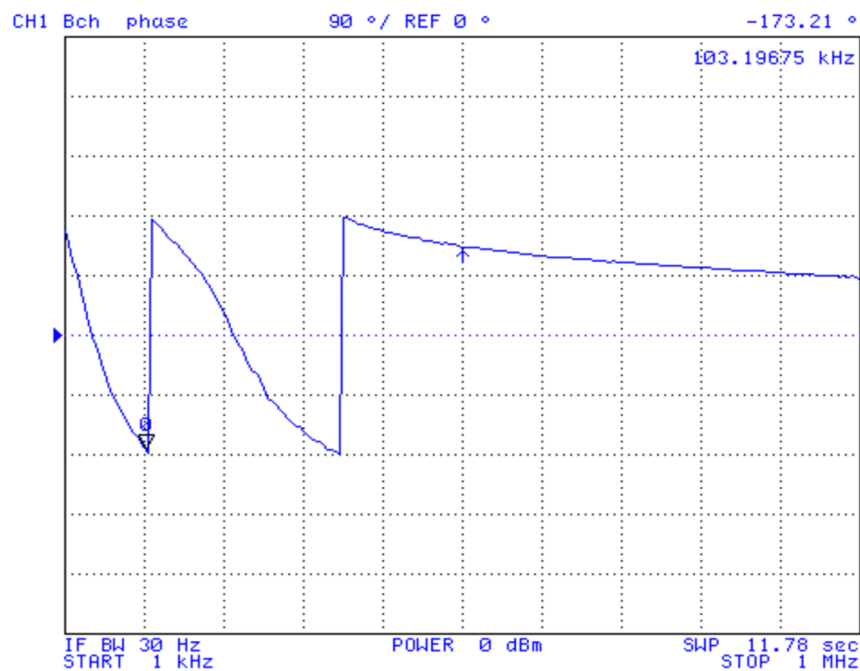
Obr. D.1: Obrázok originálneho merania modulu dolnej priepusti 2. rádu pri napätí $\pm 1,65$ V



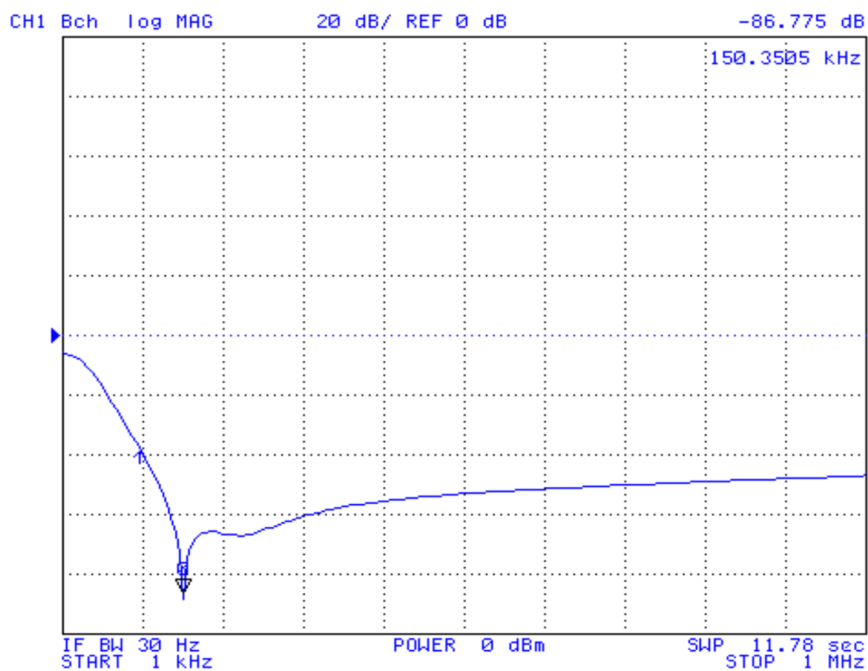
Obr. D.2: Obrázok originálneho merania fáze dolnej priepusti 2. rádu pri napätí $\pm 1,65\text{ V}$



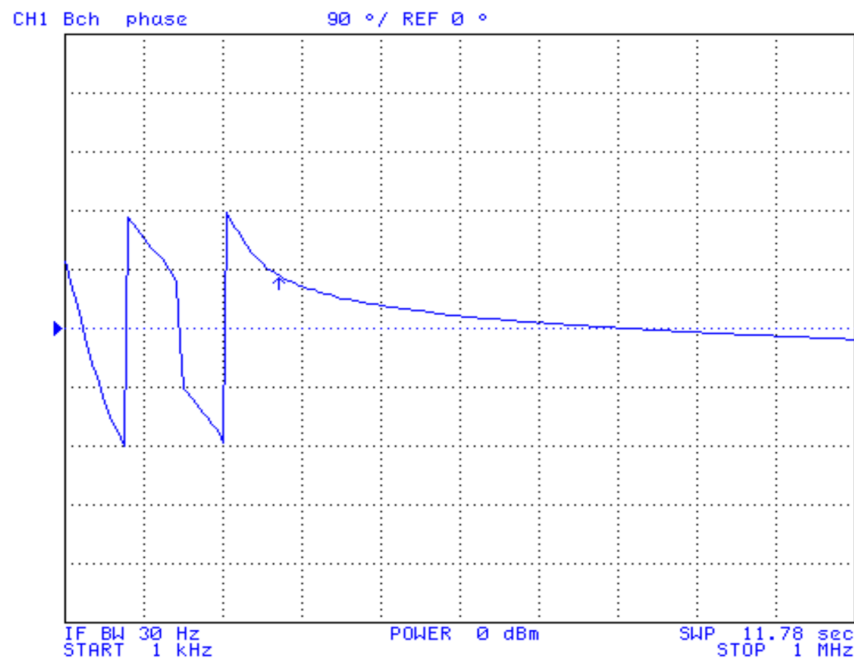
Obr. D.3: Obrázok originálneho merania modulu dolnej priepusti 4. rádu pri napätí $\pm 1,65\text{ V}$ (priame zapojenie)



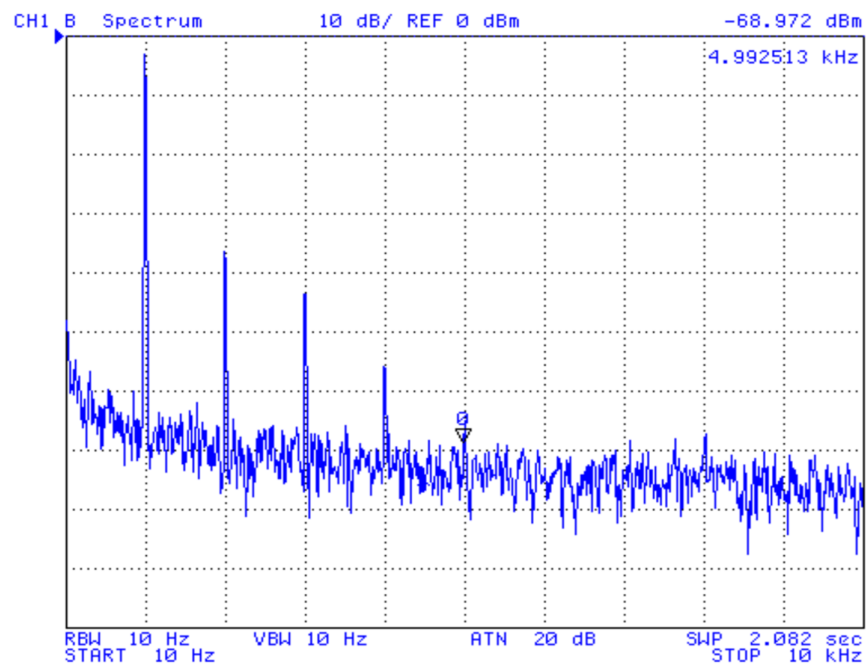
Obr. D.4: Obrázok originálneho merania fáze dolnej priepusti 4.rádu pri napätí $\pm 1,65$ V (priame zapojenie)



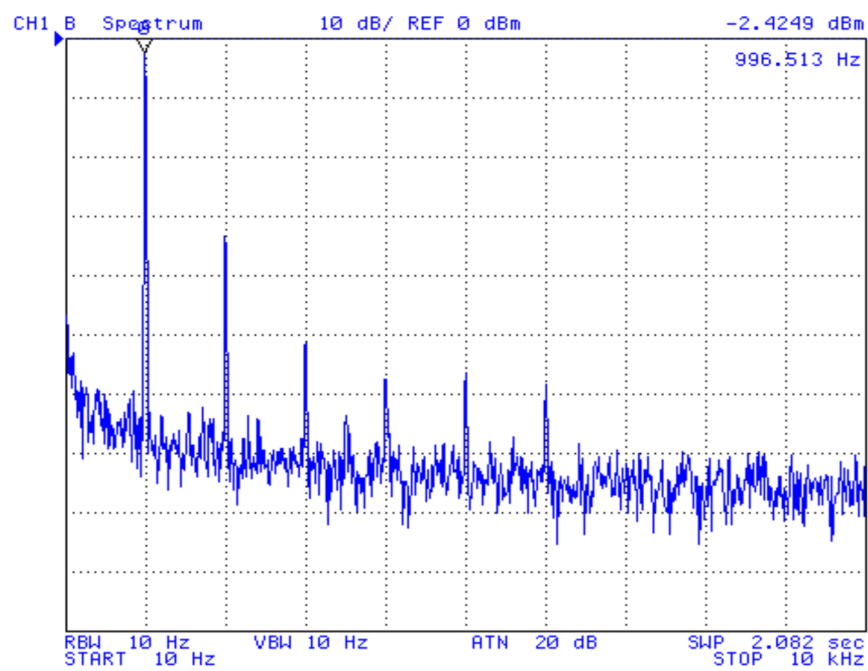
Obr. D.5: Obrázok originálneho merania modulu dolnej priepusti 4.rádu pri napätí $\pm 1,65$ V (krížené zapojenie)



Obr. D.6: Obrázok originálneho merania fáze dolnej priepusti 4.rádu pri napätí $\pm 1,65$ V (krížené zapojenie)



Obr. D.7: Obrázok originálneho merania, spektrum signálu pre THD dolnej priepusti 4. rádu (priame zapojenie)



Obr. D.8: Obrázok originálneho merania, spektrum signálu pre THD dolnej priepusti 4. rádu (krížené zapojenie)

E Obsah priloženého CD

```
/ ..... koreňový adresár priloženého CD
├── Bakakárska práca ..... hlavný súbor bakalárskej práce
├── Obrázky
│   ├── schema_dosky_meranie.pdf
│   ├── doska_plosnych_spojov_zhora.png
│   ├── doska_plosnych_spojov_zospodu.png
│   ├── doska_plosnych_spojov_suciastky.png
│   ├── obrazok_dosky_zhora.png
│   ├── obrazok_dosky_zospodu.png
│   ├── kaskadove_zapojenie.png
│   ├── kaskadove_zapojenie_prac.png
│   ├── zapojenie_pracovisko.png
│   ├── schema_prevodnikND.pdf
│   ├── obrazok_prevodnikND_zhora.png
│   ├── obrazok_prevodnikND_zospodu.png
│   ├── schema_prevodnikDN.pdf
│   ├── obrazok_prevodnikDN_zhora.png
│   ├── obrazok_prevodnikDN_zospodu.png
│   ├── original_modul2rad.png
│   ├── original_faza2rad.png
│   ├── original_modul4rad_priamo.png
│   ├── original_faza4rad_priamo.png
│   ├── original_modul4rad_kriz.png
│   ├── original_faza4rad_kriz.png
│   ├── spektrum_signalu4rad_priamo.png
│   ├── spektrum_signalu4rad_kriz.png
│   ├── original_modul2rad_znizene_napätie.png
│   ├── original_faza2rad_znizene_napätie.png
│   ├── original_modul4rad_priamo_znizene_napätie.png
│   ├── original_faza4rad_priamo_znizene_napätie.png
│   ├── original_modul4rad_kriz_znizene_napätie.png
│   ├── original_faza4rad_kriz_znizene_napätie.png
│   ├── original_cmrr2rad.png
│   ├── original_cmrr4rad.png
│   ├── original_cmrr2rad_znizene_napätie.png
│   └── original_cmrr4rad_znizene_napätie.png
├── Návrh_dosiek ..... súbory návrhu dosiek v programe Eagle
│   ├── Final.sch
│   ├── Diff2Sin.sch
│   └── Sin2Diff.sch
```